ETUDE DES TENDANCES DANS LES SERIES CHRONOLOGIQUES DE LA QUALITE DE L'EAU DES LACS DU RESEAU TADPA-QUEBEC

CENTRE SAINT-LAURENT

Environnement Canada
Conservation et Protection
Région du Québec

Environment Canada
Conservation and Protection
Quebec Region

90-06692/

Etude des tendances dans les séries chronologiques de la qualité de l'eau des lacs du réseau TADPA-Québec

par
André Bouchard
et
John Haemmerli

Environnement Canada
Conservation et Protection
Région du Québec
Centre St-Laurent
Direction des eaux intérieures

Mars 1990

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier les personnes suivantes pour leurs contributions au présent rapport : Madeleine Papineau d'Environnement Canada ainsi que Marius Lachance de l'INRS-Eau pour leurs commentaires lors de la révision du présent texte, Denis Labonté d'Environnement Canada pour les aspects de présentation ainsi que les nombreuses autres personnes impliquées de près ou de loin dans l'échantillonnage du réseau. Le personnel des laboratoires de Longueuil et de Burlington méritent aussi une mention pour le support soutenu au fil des années.

Résumé

Le réseau TADPA-Québec a été conçu et structuré afin de détecter une tendance dans la qualité des eaux de surface de lacs de tête inférieure ou égale à l'écart type de la série des résidus et ce pour les principaux paramètres liés à l'acidification des lacs soient le pH, les sulfates, l'alcalinité et la somme des cations, après sept à dix ans d'échantillonnage avec un niveau de confiance ($1-\alpha$) de 90% et une puissance du test ($1-\beta$) de 90% également.

Des tests non-paramétriques de détection de tendances tenant compte de la saisonnalité et de la persistance ont été appliqués aux séries de données de qualité de l'eau (n=25-30 observations).

L'analyse des séries de données de cinq ans montre des tendances régionales à la hausse pour les sulfates dans les lacs des régions 1, 2 et 3 (21 lacs) avec des tendances individuelles à la baisse pour les lacs temporels (4 lacs) des régions 4 et 5. Les lacs temporels de la région 1 du réseau montrent des tendances décroissantes dans le pH ce qui correspond bien avec les résultats d'une étude paléolimnologique. De plus, dans la région 1, il y a une tendance régionale décroissante dans l'alcalinité des lacs (6 lacs) de même que des tendances individuelles à la baisse dans les lacs temporels.

Les régions 1 et 2 qui couvrent le territoire à l'est du réseau montrent des tendances régionales à l'acidification et en particulier dans les lacs Bonneville (101), Lagou (102), et Lemaine (202). Les régions 4 et 5 occupant la partie ouest du réseau ont un comportement inverse c'est-à-dire qu'ils présentent des signes d'amélioration.

Dans l'ensemble, un des objectifs de départ du réseau a été atteint à savoir qu'il a été possible de détecter des tendances possédant des rapports $Tr/\sigma e$ inférieurs à 1.

Certains paramètres nécessitent cependant un nombre de données plus considérable avant que la détection de tendance puisse être possible et ceci afin de pallier à l'effet de dépendance souvent présent entre les observations.

Abstract

The TADPA-Québec network was designed to detect a trend in the water quality of headwater lakes smaller than or equal to the standard deviation of the residual series for the main parameters linked to lake acidification such as pH, sulfates, alkalinity and the sum of cations after seven to ten years of sampling with a confidence level ($1-\alpha$) of 90% and a testing power ($1-\beta$) of 90%.

Non-parametric tests for trend detection which take to account seasonality as well as persistance were applied to water quality time series data (n=25-30 observations).

Analysis of the first five years of data shows a regional increase in sulfates for regions 1, 2 and 3 (21 lakes) with individual series showing a decrease for the four temporal lakes located in regions 4 and 5. Temporal lakes in region 1 show decreases in pH. This is in agreement with the results of a paleolimnological study. Furthermore, region 1 shows a regional decrease in alkalinity (6 lakes) as well as decreases in the individual temporal lakes for the same parameter.

Regions 1 and 2 which cover the eastern part of the network show regional trends toward acidification particularly in lakes Bonneville (101), Lagou (102) and Lemaine (202). Regions 4 and 5 which occupy the western part of the network show the opposite behaviour and they are improving.

In all, one of the initial objectives of the network was reached as trends with a $Tr/\sigma e$ ratio lower than 1 were actually detected. Some parameters require longer data series in order to permit trend detection to counter the dependance that often exists between observations.

Table des matières

page

Remerciements..... v

Résumé..... vii

Abstract..... ix

Table des matières..... xi

Liste des tableaux..... xiii

Liste des figures..... xv

1) Introduction..... 1

2) Cadre statistique du réseau TADPA-Québec..... 3

3) Banque de données..... 3

4) Redéfinition du cadre statistique..... 5

5) Application des tests aux séries chronologiques..... 11

i) Caractéristiques des séries analysées..... 11

ii) Evaluation des tendances détectées..... 13

iii) Caractérisation régionale et spatiale..... 30

6) Discussion..... 39

7) Conclusion..... 45

8) Bibliographie..... 47

page

Annexe 1-Etapes de fonctionnement du logiciel DETECT..... 49

Annexe 2-Graphiques - Séries avec tendances monotones..... 57

Annexe 3-Fiches des tests non paramétriques utilisés par DETECT..... 73

Annexe 4-Liste des lacs du réseau TADPA-Québec..... 83

Liste des tableaux

page

1) Tests utilisables avec efficacité asymptotique relative (Berryman et al., 1988)..... 6

2) Conditions d'application des divers tests utilisés (Berryman et al., 1988)..... 7

3) Durée d'échantillonnage nécessaire (en années) pour détecter certains seuils définis en fonction de différentes fréquences de prélèvement pour une puissance du test de 90% et un niveau de signification de 5% (Lachance, 1988)..... 9

4) Amplitude détectable de la tendance Tr/σe en fonction de la fréquence de prélèvement et de la période de mesure pour une puissance du test de 90% et un niveau de signification de 5% (Lachance, 1988)..... 10

5) Persistance et saisonnalité des séries des lacs temporels du réseau TADPA (en nombre de lacs)..... 11

6) Séries chronologiques avec tendances significatives..... 14

7) Séries avec tendances significatives - Désaisonnalisées..... 15

8) Séries chronologiques sans tendances significatives..... 16

9) Séries sans tendances significatives - Désaisonnalisées..... 18

Liste des figures

Page

1) Localisation des lacs du réseau TADPA-Québec..... 2

2) Droites de régression - pH des lacs Bonneville et Lagou..... 22

3) Droites de régression - pH du lac Chevreuil et alcalinité du lac Bonneville..... 23

4) Droites de régression - Alcalinité des lacs Lagou et Chevreuil..... 24

5) Droites de régression - Sulfates des lacs Lemaine et Chevreuil..... 25

6) Droites de régression - Sulfates des lacs Kidney et Blais..... 26

7) Droites de régression - Sulfates du lac David et nitrates du lac Lagou..... 27

8) Droites de régression - Nitrates des lacs Eclair et Kidney..... 28

9) Graphiques du type Box-and-Whisker pour les sulfates des régions 1 & 2 du réseau TADPA..... 31

10) Graphiques du type Box-and-Whisker pour les sulfates de la région 3 et l'alcalinité de la région 1 du réseau TADPA..... 32

11) Graphiques du type Box-and-Whisker pour l'alcalinité de la région 4 et la somme des cations de la région 2 du réseau TADPA..... 33

page

12) Graphique du type Box-and-Whisker pour la somme des cations de la région 4 du réseau TADPA..... 34

13) Distribution spatiale des sulfates 1983-1988..... 35

14) Tendances dans la qualité de l'eau des lacs du sud du Québec..... 38

15) Graphique des tendances significatives par test statistique..... 40

16) Graphique des tendances non significatives par test statistique..... 41

1) Introduction :

Dans le cadre des négociations Canada-Etats-Unis sur les précipitations acides, au début des années 80, Environnement Canada décidait de mettre sur pied un programme de surveillance de la qualité des eaux destiné à mettre en évidence l'effet d'une éventuelle réduction des émissions de polluants sur le milieu aquatique. Le contexte nord-américain du transport à distance des polluants aéroportés (TADPA), que ce soit pour les zones d'émission, les trajectoires, les retombées, la sensibilité des régions touchées et les effets sur le milieu, est documenté par de nombreux auteurs. Il n'entre pas dans le cadre de ce rapport d'en parler plus avant.

Après examen des documents et des données existants, et après traitement de sa propre banque de données, la Direction des eaux intérieures, région de Québec, mettait sur pied la composante québécoise du réseau national, le réseau TADPA-Québec (figure 1), en suivant une procédure rigoureuse (Bobée et al., 1983). L'objectif était double, il fallait pouvoir détecter des tendances dans le temps et dans l'espace, advenant un changement, dans les 5 à 7 ans suivant celui-ci, dans un cadre statistique déterminé.

Le réseau, en avril 1988, était composé de 16 stations temporelles (échantillonnées aux deux mois) et 25 stations spatiales (échantillonnées aux six mois) situées entre l'Outaouais et le Saguenay. Ce territoire couvre un gradient général décroissant de minéralisation et de sensibilité aux pluies acides qui va de l'ouest vers l'est. Commencé en mai 1983, l'échantillonnage a maintenant dépassé les cinq ans. Ce rapport examine donc quelques caractéristiques des séries chronologiques obtenues pour les stations temporelles du réseau et discute de l'atteinte des objectifs tels qu'ils avaient été planifiés en 1983.

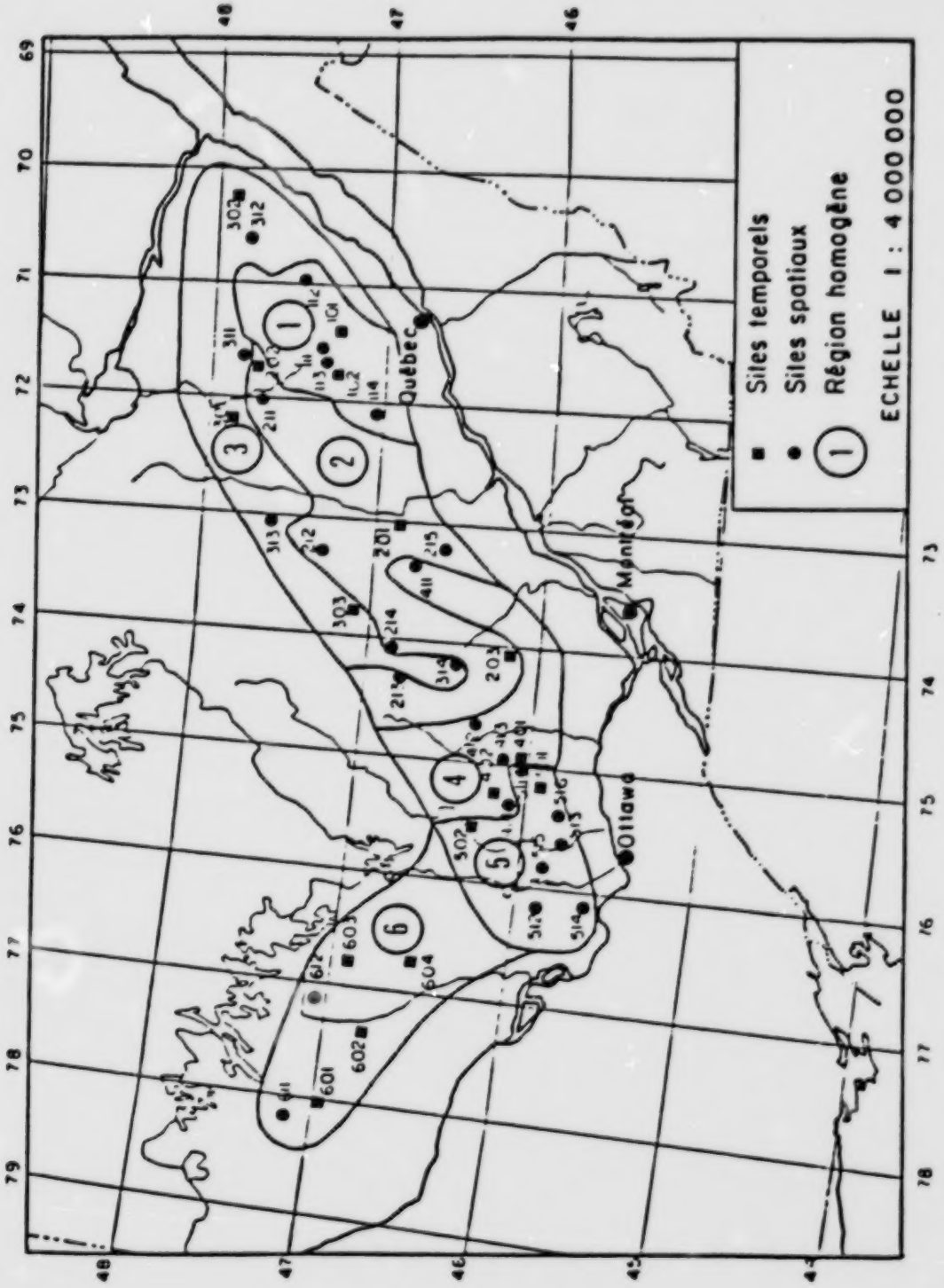


Figure 1 : Localisation des lacs du réseau TADPA-Québec.

Source : Haemmerli, 1988

2) Cadre statistique du réseau TADPA-Québec :

En 1983, à part une série de deux ans provenant de l'échantillonnage hebdomadaire du lac Laflamme, un bassin calibré situé dans la réserve des Laurentides, aucune série chronologique n'était disponible pour documenter l'évolution temporelle de la qualité des eaux des lacs de tête situés sur le Bouclier canadien, au sud du Québec. C'est alors qu'il a été décidé d'utiliser le cadre statistique défini par Lettenmaier et Burges (1977), qui permet de choisir la taille de l'échantillon à prélever, pour une période donnée, permettant de détecter une tendance d'amplitude déterminée par rapport à l'écart-type de la série des résidus, en fonction de l'autocorrélation de celle-ci, du niveau de confiance et de la puissance du test appliqué.

L'objectif était de détecter une tendance inférieure ou égale à l'écart type de la série des résidus, après 5 à 7 ans, pour un niveau de confiance ($1-\alpha$) et une puissance du test ($1-ß$) de 90%. En fonction des coefficients d'autocorrélation des séries du lac Laflamme, la fréquence appropriée était de six échantillons par an, à intervalles réguliers de deux mois.

3) Banque de données :

L'échantillonnage du réseau TADPA a débuté le 29 mai 1983. Les dates d'échantillonnage, les variables analysées, les noms et la localisation des sites, le protocole d'échantillonnage et les méthodes d'analyse de même que le protocole de validation des données sont documentés dans Haemmerli (1988) qui contient la

banque de données en date du 6 avril 1988. Pour les besoins du présent rapport les noms et les numéros des lacs du réseau TADPA se situent à l'annexe 4. Le rapport d'Haemmerli (1988) contient aussi la documentation concernant le transfert partiel du laboratoire national, à Burlington, au laboratoire régional, à Longueuil, à la fin de 1984 (tournées 10 et 11), qui montre que mis à part les cations majeurs, les séries des deux laboratoires n'appartiennent pas à la même population statistique. Un tel changement peut donc induire l'équivalent d'une tendance par saut et ainsi compliquer de façon notoire l'interprétation des changements progressifs à long terme. L'analyse des séries du réseau doit donc tenir compte de ce fait par le biais de tests propres aux tendances par saut. Notons ici que le transfert de laboratoire a été partiel dans la mesure où les métaux (aluminium, manganèse, fer) sont toujours analysés à Burlington qui possède la capacité d'effectuer de telles analyses.

Dans le présent rapport, huit variables de qualité sont considérées, soient le pH (ou parfois sous la forme H^+), la somme des cations (Ca, Mg, Na, K), l'alcalinité totale, les sulfates (colorimétrie), les nitrates, la conductivité, l'aluminium et la silice. Le pH représente le taux d'acidité des lacs tandis que l'alcalinité est plutôt un indice du pouvoir tampon. La silice, la somme des cations et la conductivité pour leur part représentent la minéralisation alors que les sulfates sont indicateurs des dépôts atmosphériques. Enfin les nitrates et l'aluminium ont été retenus par intérêt et, dans le cas de l'aluminium, parce que ce paramètre est habituellement lié à l'acidification.

Pour chaque variable il existe douze séries correspondant à douze des seize lacs temporels. Les quatre autres lacs temporels (région 6) ne contenant pas assez de données, il n'a pas été possible de les inclure dans le présent rapport. Neuf séries sont complètes, constituées de 30 valeurs, trois autres n'en contenant que 25, l'échantillonnage de ces lacs ayant commencé en 1984. Pour les tournées 10 et 11 (novembre 1984 et février 1985), il y a chevauchement, puisque les échantillons ont

été analysés à la fois à Burlington et à Longueuil, pour documenter le transfert. Il a été décidé d'utiliser les neuf premières valeurs analysées à Burlington et les 21 suivantes (tournées 10 à 30) analysées à Longueuil, pour former une série de 25 ou de 30 valeurs utilisable pour la caractérisation temporelle de l'évolution des variables de qualité. Certaines séries (notamment l'alcalinité) comprennent des valeurs sous la limite de détection de la méthode d'analyse chimique. Celles-ci ont été remplacées par les deux tiers de la limite de détection (ex. <0,1 est remplacé par 0,067).

4) Redéfinition du cadre statistique :

Peu après que le réseau ait été conçu et implanté, d'autres travaux ont été effectués, notamment l'inventaire des tests destinés à la détection de tendances dans les séries chronologiques de qualité de l'eau présentant de la persistance et de la périodicité (Berryman, 1984) et la détermination de ces caractéristiques pour les séries du lac Laflamme, alors longues de trois ans (Berryman et al., 1988).

Les tableaux 1 et 2 proviennent directement de Berryman et al., (1988). Les différents tests retenus ainsi que leur puissance (efficacité asymptotique relative - voir section 6 du rapport) apparaissent au tableau 1, alors que le tableau 2 documente les conditions d'application selon le type de tendance à détecter, la persistance et la périodicité des séries. Ces tableaux étaient accompagnés d'une procédure de sélection et d'application des tests. Ces travaux ont été repris, complétés, et ont abouti à l'élaboration d'un logiciel de détection de tendances, DETECT (Cluis et al., 1988), dont les principales étapes sont présentées à l'annexe 1, et qui a été utilisé pour la caractérisation des séries chronologiques des lacs du réseau.

Tableau 1 : Tests utilisables avec efficacité asymptotique relative.

Type of Trend	Test	Power*
Monotonic	Test of the number of homogeneous sequences	<< Kendall test, < Stuart test[1]
	Test of the number of critical points	0.02 where Kendall = 0.96[2]**
	Irwin-Fischer	0.78[3]*
	Foster and Stuart	0.18 where Kendall = 0.96[2]**
	Test of the number of successive differences	0.0 where Kendall = 0.96[2]**
	Cox-Stuart	0.78[3]*
	Kendall	0.98[3]*
	Spearman	0.98[3]*
	Friedman	0.912[1]
	Page	- - -
	Intrablock tests	< aligned ranks[3]
	Aligned ranks tests	0.955[3]*
Step	Wald-Wolfowitz	Low[4,5]
	Kolmogorov-Smirnov	0.64[4,5]*
	Median	0.63[4]*
	Mann-Whitney	0.955[4]*
	Terry-Hoeffding	1.0[3,5]*
	Van-der-Warden	1.0[3,5]*
	Bell-Doksum	1.0[3,5]*
Multistep	Kruskall-Wallis	0.955[1]*
	Terpstra-Jonckeere	0.955[6]*
	Puri	1.0[7]*

*Asymptotic relative efficience (ARE).
**Power for n = 100, $\alpha = 0.05$, and Δ between observations = 0.01.
References:
[1]Cochet and Bobée (1980).
[2]Foster and Stuart (1954).
[3]Marascuilo and McSweeney (1977).
[4]Siegel (1956).
[5]Conover (1971).
[6]Hollander and Wolfe (1973).
[7]Puri (1967).

Source : Berryman et al, 1988

Tableau 2 : Conditions d'application des divers tests utilisés.

Trend Type	No. of Stations	Series Characteristics		Test	Adaptation in W.Q. Reference	N Minimum*
		Persistence	Periodicity			
Step	1	No	No	Mann-Whitney	– –	5**
	1	Yes, Markovian order 1	No	Mann-Whitney	Lettenmaier (1976)	20
	1	No	Yes	Intrablock test	Berryman (1984a)	12
	1	Yes	Yes	Intrablock test	Berryman (1984a)	?
Monotonous	1	No	No	Spearman	– –	11
	1	No	No	Kendall	– –	9
	1	Yes, Markovian order 1	No	Spearman	Lettenmaier (1976)	20
	1	No	Yes	Intrablock	Hirsch, *et al.* (1982)	24 (2 years, 12 months)
	1	No	Yes	Aligned tests	Farrell (1980)	20 (5 years, 4 seasons)
	1	Yes	Yes	Intrablock for persistent data	Hirsch and Slack (1984)	120 (10 years, 12 months)
	≥1	No	Yes	Analysis of variance and chi-square test	Van Belle and Hughes (1984)	240 (10 years, 12 months, 2 stations)
Homogeneity of monthly trends	1	No	Yes	Chi-square	Van Belle and Hughes (1984)	120 (10 years, 12 months)
	≥1	No	Yes	Analysis of variance and chi-square test	Van Belle and Hughes (1984)	240 (10 years, 12 months, 2 stations)

*Minumum number of observations to apply the method.
**Ten observations are needed to conduct a test with $\alpha = 0.05$, and five are required if $\alpha = 0.1$.

Source : Berryman et al, 1988

Dans le contexte plus général de la conception d'un plan d'échantillonnage rationnel, Lachance (1988) a repris l'ensemble de la procédure utilisée pour la conception du réseau TADPA-Québec, dont les aspects d'optimisation temporelle. Il a travaillé avec les quatre variables ayant servi à l'analyse multivariée (à la division en régions homogènes), soit le pH, l'alcalinité, les sulfates et la somme du calcium et du magnésium (Bobée et al., 1983), à partir de séries de six ans au lac Laflamme (312 valeurs).

Après avoir soustrait la composante saisonnière, au moyen d'une moyenne mobile qui réduit la longueur de la série à 260 valeurs, et d'éventuelles tendances, il obtient quatre séries stationnaires pour lesquelles il détermine la persistance. A partir de cette caractéristique, il montre, comme l'avaient fait Berryman et al. (1988) avec des séries de trois ans, que pour détecter une tendance égale à l'écart-type de la série, avec six échantillonnages par an, la durée d'opération du réseau sera plus vraisemblablement de 20 ans que de 10 ans (tableau 3). Ces chiffres sont donnés pour un α de 5% et un ß de 10%, alors que l'objectif original mentionnait 10% pour les deux valeurs. Ceci diminue quelque peu la durée nécessaire. Le tableau 3 montre également que si on double la fréquence d'échantillonnage (donc les ressources), on n'obtient pas une réduction proportionnelle de la durée d'échantillonnage, sauf peut-être pour le pH, dont la persistance est moindre. Dans le cas des trois autres séries, dont l'alcalinité qui présente encore une persistance significative après huit semaines, la réduction de la durée d'échantillonnage n'est que de 20% à 35%. Cette même augmentation de la fréquence se traduirait, après 10 ans, par une réduction du rapport tendance/écart type de 10% à 25% seulement (tableau 4).

Tableau 3 : Durée d'échantillonnage nécessaire (en années) pour détecter certains seuils définis en fonction de différentes fréquences de prélèvement pour une puissance du test de 90% et un niveau de signification de 5%

Tr/Sigmae	Echantillons annuels	Alcalinité	Sulfates	Ca+Mg	pH
2.0	6	8.2	6.9	6.2	5.6
	8	7.3	5.8	5.3	4.5
	13	6.7	4.7	4.3	3.3
	26	6.2	4.0	3.6	2.5
1.5	6	13.9	11.6	10.4	9.5
	8	12.4	9.9	9.0	7.6
	13	11.3	8.0	7.3	5.5
	26	10.5	6.7	6.0	4.3
1.0	6	31.4	26.1	23.4	21.3
	8	27.9	22.3	20.2	17.1
	13	25.5	18.1	16.4	12.5
	26	23.7	15.1	13.5	9.6
0.7	6	64.0	53.3	47.8	43.4
	8	57.0	45.4	41.2	35.0
	13	52.1	36.9	33.5	25.5
	26	48.3	30.7	27.8	19.5

Source : Lachance (1988)

Tableau 4 : Amplitude détectable de la tendance Tr/∞e en fonction de la fréquence de prélèvement et de la période de mesure pour une puissance du test de 90% et un niveau de signification de 5%.

Période considérée	Echantillons annuels	Alcalinité	Sulfates	Ca+Mg	pH
5 ans	6	2.61	2.37	2.23	2.13
	8	2.46	2.17	2.06	1.89
	13	2.34	1.94	1.85	1.60
	26	2.24	1.77	1.67	1.39
10 ans	6	1.77	1.62	1.53	1.46
	8	1.67	1.49	1.42	1.31
	13	1.60	1.34	1.28	1.12
	26	1.54	1.23	1.16	0.98
15 ans	6	1.45	1.32	1.25	1.19
	8	1.36	1.22	1.16	1.07
	13	1.30	1.10	1.05	0.91
	26	1.26	1.00	0.95	0.80
20 ans	6	1.25	1.14	1.08	1.03
	8	1.18	1.06	1.00	0.93
	13	1.13	0.95	0.91	0.79
	26	1.09	0.87	0.82	0.69

Source : Lachance (1988)

5) Application des tests aux séries chronologiques :

i) Caractéristiques des séries analysées :

Les tests statistiques appropriés ont été appliqués aux séries mesurées sur les lacs temporels du réseau. Tout d'abord, les caractéristiques des séries (persistance, saisonnalité) ont été déterminées pour les séries des 12 stations temporelles du réseau-TADPA Québec pour lesquelles existaient au moins 25 valeurs (3 stations) et au plus 30 valeurs (les 9 autres). Les résultats sont présentés au tableau 5.

Ce tableau montre que les variables utilisées possèdent relativement peu de persistance sauf pour les sulfates et la silice. Huit des douze lacs temporels du

Tableau 5 : Persistance et saisonnalité des séries des lacs temporels du réseau TADPA (en nombre de lacs). * = Oui, [-] = Non, nM = non Markovien.

Variable	Persistance		Saisonnalité	
	nbre de lacs		nbre de lacs	
	*	[-]	*	[-]
pH	5	7		12
H+	3	9		12
Som. Cat.	3	9	7	5
Alc	4	8	1	11
SO4	8	4		12
NO3	1 (1 nM)	11	12	
Cond.	3	9	5	7
Al	5 (1 nM)	7	2	10
SiO2	10	2	10	2

réseau montrent de la persistance pour les sulfates tandis que dix des douze lacs en montrent pour la silice. A un niveau inférieur, le pH et l'aluminium montrent des valeurs persistantes dans cinq des douze lacs étudiés ce qui est non négligeable.

A l'intérieur des divers paramètres il existe des variations dans la persistance qui peuvent être expliquées en partie par les caractéristiques des bassins versants (lacs) étudiés. Les temps de résidence plus longs rencontrés dans les bassins de plus forte taille vont favoriser le phénomène de persistance dans les données. Les nitrates sont les seuls à montrer de l'homogénéité de ce côté. Un seul lac montre une persistance qui est dans ce cas non Markovienne. Dans DETECT et selon Cluis et al (1988), une persistance est Markovienne si le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 est significativement différent de 0 alors que le coefficient d'autocorrélation partielle d'ordre 2 n'est pas significativement différent de 0. Une persistance sera non Markovienne si le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 et le coefficient d'autocorrélation partielle d'ordre 2 sont significativement différents de 0.

La saisonnalité fait référence à la présence d'une composante cyclique dans une série chronologique. Cette composante est, dans le cas présent, largement liée à la présence des diverses saisons. Parmi les séries à l'étude ce sont les nitrates qui présentent les plus fortes saisonnalités. Les douze lacs étudiés ont un comportement saisonnier pour ce paramètre. Ceci est expliqué par le rôle des nitrates dans le cycle biologique. Les seuls autres paramètres qui démontrent des saisonnalités importantes sont la somme des cations, la conductivité et la silice qui sont des variables reliées au régime hydrologique.

Il existe moins de variations en termes du nombre de lacs avec ou sans saisonnalité pour les divers paramètres par rapport à la persistance. La somme des cations et la conductivité sont particulièrement divisées à ce niveau. Seulement une

partie des lacs montrent de la saisonnalité (sept lacs sur douze pour la somme des cations et cinq lacs sur douze pour la conductivité). Le temps de résidence des eaux pourrait encore expliquer ce phénomène. Il existe aussi des variations semblables pour l'alcalinité, l'aluminium et la silice mais celles-ci sont assez mineures en comparaison avec les deux autres variables.

ii) Evaluation des tendances détectées :

Les résultats de l'analyse des séries du réseau TADPA sont présentés aux tableaux 6 à 9. On y retrouve les caractéristiques de persistance et de saisonnalité ainsi que la présence et le type de tendances détectées. Les deux premiers tableaux présentent les séries possédant des tendances significatives alors que les deux derniers donnent la liste des séries ne possédant pas de tendances détectables. Les tableaux contiennent aussi de l'information concernant le type de test appliqué par DETECT ainsi que le rapport Tr/σe qui représente le quotient de la tendance détectée (valeur finale - valeur initiale de la variable selon une droite de régression) sur l'écart type de la série des résidus.

Comme mentionné ci-dessus, la tendance est calculée en soustrayant la valeur initiale de la série temporelle de la valeur finale. Ces valeurs sont évaluées à partir de la droite de régression car les tendances sont linéaires par hypothèse (augmentation ou diminution uniforme de la moyenne générale de la variable).

La valeur de σe (écart type de la série des résidus) est évaluée par le logiciel DETECT. Normalement, lorsque la série de données ne présente pas de saisonnalité, le σe donné par DETECT représente l'écart type des résidus. En présence de saisonnalité, la valeur de σe de même que la valeur de la tendance pourront inclure

Tableau 6 - Séries chronologiques avec tendances significatives

Variable	Tr/øe	Lac	Test Utilisé	Sais.	Pers.	Tend.
pH	1.86	101	Spear./Letten.	---	*	TMD
pH	1.96	102	Kendall	---	---	TMD
pH	2.03	401	Spear./Letten.	---	*	TMD
H^+	1.62	101	Kendall	---	---	TMC
H^+	1.69	102	Spear./Letten.	---	*	TMC
H^+	1.60	401	Kendall	---	---	TMC
Somcat	2.92	203	Spear./Letten. (HS)	---	*	TMC
Somcat	*2.40	302	Kendall Sais.	*	---	TMC
Somcat	*1.48	502	Kendall Sais.	*	---	TMC
Alct 1-30	4.19	101	Spear./Letten.	---	*	TMD
Alct 1-30	2.81	102	Spear./Letten.	---	*	TMD
Alct 1-30	0.99	203	Kendall	---	---	TMC
Alct 1-30	1.56	303	Kendall	---	---	TMD
Alct 1-30	2.29	401	Kendall	---	---	TMD
Alct 1-30	1.14	402	Kendall	---	---	TMC
Alct-Saut	2.46	102	Mann-Whit./Letten.	---	*	TPSN
Alct-Saut	1.33	303	Mann-Whitney	---	---	TPSN
Alct-Saut	2.05	401	Mann-Whitney	---	---	TPSN
Alct-Saut	1.40	501	Mann-Whitney	---	---	TPSN
Alct-Saut	0.99	502	Mann-Whitney	---	---	TPSN
Alct 10-30	1.57	203	Kendall	---	---	TMC
Alct 10-30	*2.32	302	Kendall Sais.	*	---	TMC
Alct 10-30	3.49	402	Kendall	---	---	TMC
SO_4CO	1.80	202	Spear./Letten.	---	*	TMC
SO_4CO	2.60	401	Spear./Letten.	---	*	TMD
SO_4CO	5.01	402	Spear./Letten.	---	*	TMD
SO_4CO	2.16	501	Kendall (S/L)	---	---	TMD
SO_4CO	2.32	502	Spear./Letten.	---	*	TMD
NO_3	*2.60	102	Kendall Sais.	*	---	TMC
NO_3	*0.63	201	Kendall Sais.	*	---	TMC
NO_3	*0.70	203	Kendall Sais.	*	---	TMC
NO_3	*1.43	301	Kendall Sais.	*	---	TMC
NO_3	*0.73	303	Kendall Sais.	*	---	TMC
NO_3	*2.42	402	Kendall Sais.	*	---	TMC
Cond.	1.47	202	Kendall	---	---	TMC
Cond.	*3.80	203	Hirsch & Slack	*	*	TMC
Cond.	*3.56	302	Kendall Sais. (HS)	*	---	TMC
Al	1.18	401	Kendall	---	---	TMD
SiO_2	*1.50	201	Kendall Sais.	*	---	TMC
SiO_2	*4.03	202	Hirsch & Slack	*	*	TMC
SiO_2	*2.50	301	Hirsch & Slack	*	*	TMC
SiO_2	*3.06	302	Hirsch & Slack	*	*	TMC
SiO_2	*5.58	303	Hirsch & Slack	*	*	TMD

Légende :

Sais. = Saisonnalité (*=oui, ---=non)
Pers. = Persistance (*=oui, ---=non)
Tend. = Tendance :

TMD=Tendance Monotone Décroissante.
TMC=Tendance Monotone Croissante.
TPSN=Tendance Par Saut Négative.

Note : Dans la colonne Tr/øe, les astérisques (*) signifient que les valeurs proviennent de séries désaisonnalisées.

Tableau 7 - Séries avec tendances significatives - Désaisonnalisées

Var.	Tr/ae	Lac	Test Utilisé	Sais.	Pers.	Tend.
Somcat	2.40	302	Kendall	---	---	TMC
Somcat	1.48	502	Kendall	---	---	TMC
Alct 10-30	2.32	302	Kendall	---	---	TMC
NO_3	2.60	102	Spear./Letten.	---	*	TMC
NO_3	0.63	201	Kendall	---	---	TMC
NO_3	0.70	203	Spear./Letten.	---	*	---
NO_3	1.43	301	Kendall	---	---	---
NO_3	0.73	303	Kendall	---	---	---
NO_3	2.92	402	Kendall	---	---	TMC
Cond.	3.80	203	Spear./Letten.	---	*	TMC
Cond.	3.56	302	Spear./Letten.	---	*	TMC
SiO_2	1.50	201	Spear./Letten.	---	*	---
SiO_2	4.03	202	Spear./Letten.	---	-NM	TMC
SiO_2	2.50	301	Spear./Letten.	---	*	---
SiO_2	3.06	302	Spear./Letten.	---	*	TMC
SiO_2	5.58	303	Spear./Letten.	---	*	TMD

Légende :

Sais. = Saisonnalité (*=oui, ---=non)
Pers. = Persistance (*=oui, ---=non, -NM=oui non markovienne)
Tend. = Tendance :
TMD=Tendance Monotone Décroissante.
TMC=Tendance Monotone Croissante.

Tableau 8 - Séries chronologiques sans tendances significatives

N.B. : La suite du tableau ainsi que la légende se situent à la page suivante.

Var.	Tr/ge	Lac	Test Utilisé	Sais.	Pers.	Tend
pH	0.89	201	Kendall	---	---	NEG
pH	1.33	202	Spear./Letten.	---	*	NEG
pH	0.07	203	Kendall	---	---	POS
pH	0.71	301	Kendall	---	---	NEG
pH	0.22	302	Spear./Letten.	---	*	NEG
pH	0.03	303	Kendall	---	---	NEG
pH	0.54	402	Kendall	---	---	NEG
pH	0.91	501	Kendall	---	---	NEG
pH	0.91	502	Spear./Letten.	---	*	NEG
H^+	0.33	201	Kendall	---	---	POS
H^+	0.94	202	Spear./Letten.	---	*	POS
H^+	0.14	203	Kendall	---	---	POS
H^+	0.41	301	Kendall	---	---	POS
H^+	0.10	302	Spear./Letten.	---	*	NEG
H^+	0.55	303	Kendall	---	---	NEG
H^+	0.29	402	Kendall	---	---	NEG
H^+	0.64	501	Kendall	---	---	POS
H^+	0.92	502	Kendall	---	---	POS
Somcat	*2.30	101	Hirsch & Slack	*	*	NEG
Somcat	0.63	102	Kendall	---	---	NEG
Somcat	0.19	201	Kendall	---	---	NEG
Somcat	*0.84	202	Kendall Sais.	*	---	POS
Somcat	*0.13	301	Kendall Sais.	*	---	POS
Somcat	0.44	303	Kendall	---	---	NEG
Somcat	*0.18	401	Kendall Sais.	*	---	POS
Somcat	1.72	402	Spear./Letten.	---	*	POS
Somcat	*0.18	501	Kendall Sais.	*	---	POS
Alct 10-30	0.33	201	Kendall	---	---	NEG
Alct 10-30	1.15	202	Spear./Letten.	---	*	NEG
Alct 10-30	1.08	301	Spear./Letten.	---	*	NEG
Alct 10-30	*1.22	302	Kendall Sais.	*	---	POS
Alct 10-30	1.58	501	Kendall	---	---	NEG
Alct 10-30	1.14	502	Kendall	---	---	NEG
SO_4CO	0.52	101	Spear./Letten.	---	*	POS
SO_4CO	0.30	102	Kendall	---	---	POS
SO_4CO	0.59	201	Kendall	---	---	NEG
SO_4CO	1.47	203	Spear./Letten.	---	*	POS
SO_4CO	1.50	301	Spear./Letten.	---	*	POS
SO_4CO	0.87	302	Kendall	---	---	POS
SO_4CO	0.32	303	Spear./Letten.	---	*	NEG
NO_3	*0.47	101	Kendall Sais.	*	---	POS
NO_3	*1.06	202	Kendall Sais.	*	---	NEG
NO_3	*1.44	302	Hirsch & Slack	*	*	POS
NO_3	*0.73	401	Kendall Sais.	*	---	POS
NO_3	*0.43	501	Kendall Sais.	*	---	POS
NO_3	*0.55	502	Kendall Sais.	*	---	POS

suite :

Var.	Tr/øe	Lac	Test Utilisé	Sais.	Pers.	Tend.
Cond.	*0.03	101	Kendall Sais.	*	---	POS
Cond.	0.03	102	Kendall	---	---	POS
Cond.	0.22	201	Kendall	---	---	NEG
Cond.	*0.13	301	Kendall Sais.	*	---	POS
Cond.	0.91	303	Kendall	---	---	NEG
Cond.	*0.02	401	Kendall Sais.	*	---	POS
Cond.	1.64	402	Spear./Letten.	---	*	POS
Cond.	0.79	501	Kendall	---	---	NEG
Cond.	0.76	502	Spear./Letten.	---	*	POS
Al	0.87	101	Spear./Letten.	---	*	POS
Al	0.68	102	Kendall	---	---	NEG
Al	1.98	201	Spear./Letten.	---	*	NEG
Al	0.09	202	Spear./Letten.	---	*	POS
Al	*0.28	203	Hirsch & Slack	*	*	NEG
Al	0.24	301	Kendall	---	---	POS
Al	*0.35	302	Hirsch & Slack	*	*	NEG
Al	0.06	303	Kendall	---	---	NEG
Al	0.19	402	Kendall	---	---	POS
Al	0.14	501	Kendall	---	---	POS
Al	0.18	502	Kendall	---	---	NEG
SiO_2	*0.67	101	Hirsch & Slack	*	*	POS
SiO_2	0.12	102	Spear./Letten.	---	*	NEG
SiO_2	2.34	203	Spear./Letten.	---	*	POS
SiO_2	*0.22	401	Kendall Sais.	*	---	POS
SiO_2	*1.25	402	Hirsch & Slack	*	*	NEG
SiO_2	*1.01	501	Hirsch & Slack	*	*	POS
SiO_2	*1.73	502	Hirsch & Slack	*	*	NEG

Légende :

Sais. = Saisonnalité (*=oui, ---=non)
Pers. = Persistance (*=oui, ---=non)
Tend. = Tendance :
POS = Tendance Positive non significative.
NEG = Tendance Négative non significative.

Note : Dans la colonne Tr/øe, les astérisques (*) signifient que les valeurs proviennent des séries desaisonnalisées.

Tableau 9 - Séries sans tendances significatives - Désaisonnalisées

Var.	Tr/ge	Lac	Test Utilisé	Sais.	Pers	Tend.	Sig
Somcat	2.30	101	Spear./Letten.	---	*	NEG	OUI
Somcat	0.84	202	Kendall	---	---	POS	OUI
Somcat	0.13	301	Kendall	---	---	NEG	NON
Somcat	0.18	401	Kendall	---	---	NEG	NON
Somcat	0.18	501	Kendall	---	---	NEG	NON
Alct	1.22	302	Kendall	---	---	POS	OUI
NO_3	0.47	101	----	---	---	POS	---
NO_3	1.06	202	----	---	---	NEG	---
NO_3	1.44	302	Spear./Letten.	---	*	POS	NON
NO_3	0.73	401	----	---	---	POS	---
NO_3	0.43	501	Kendall	---	---	POS	NON
NO_3	0.55	502	Kendall	---	---	POS	NON
Cond.	0.03	101	Spear./Letten.	---	*	POS	NON
Cond.	0.13	301	Kendall	---	---	POS	NON
Cond.	0.02	401	Kendall	---	---	NEG	NON
Al	0.28	203	Spear./Letten.	---	*	NEG	NON
Al	0.35	302	Spear./Letten.	---	*	NEG	NON
SiO_2	0.67	101	Spear./Letten.	---	*	POS	NON
SiO_2	0.22	401	Kendall	---	---	NEG	NON
SiO_2	1.25	402	Spear./Letten.	---	*	NEG	NON
SiO_2	1.01	501	Spear./Letten.	---	-NM	NEG	NON
SiO_2	1.73	502	Kendall	---	---	NEG	OUI

Légende :

Sais. = Saisonnalité (*=oui, ---=non)
Pers. = Persistance (*=oui, ---=non, -NM=oui non markovienne)
Tend. = Tendance :
NEG = Tendance Négative.
POS = Tendance Positive.

Sig. = Signification de la tendance.

une composante cyclique. C'est pourquoi, afin d'obtenir des valeurs de Tr/σe plus réalistes, il a été nécessaire de décomposer les diverses séries chronologiques présentant une composante cyclique.

Selon Lachance (1988), "chaque observation d'une série temporelle d'une variable donnée peut être décomposée de la façon suivante :"

$$X_i = T_i + C_i + \epsilon_i$$

où :

T_i = Moyenne générale et tendance.

C_i = Composante cyclique (saisonnalité).

ϵ_i = Composante aléatoire (résidu).

Afin d'extraire la composante cyclique, une moyenne mobile de sept périodes d'échantillonnage (1 an) a été utilisée. Les données ainsi ajustées ont été réanalysées avec DETECT et les résultats sont présentés aux tableaux 7 (variables avec tendances significatives) et 9 (variables sans tendances significatives). La décomposition des séries chronologiques du réseau TADPA fera plutôt l'objet d'un rapport ultérieur.

Dans les résultats proprement dits (tableaux 6, 7, 8 et 9), trois des douze lacs temporels du réseau montrent des tendances monotones décroissantes dans le pH et donc des tendances croissantes en ions H^+ (tableau 6 - lacs 101, 102 et 401).

L'alcalinité est le paramètre qui montre le plus de variété en termes de tendance. C'est la seule variable à posséder des tendances par saut significatives. L'alcalinité semble donc avoir été particulièrement affectée par le changement de laboratoire de 1984-1985. Six des douze lacs étudiés présentent toutefois des tendances monotones significatives dont quatre qui possèdent des tendances

décroissantes (lacs 101, 102, 303 et 401) les deux autres ayant des tendances croissantes (lacs 203 et 402). Après avoir reprise l'analyse de l'alcalinité pour les tendances en saut, deux lacs additionnels démontrent des tendances par saut négatives (lacs 501 et 502). Notons que trois des lacs qui possédaient des tendances monotones négatives montrent aussi des tendances par saut négatives (102, 303 et 401) ce qui est attribuable en grande partie au changement de laboratoire. Les séries de données de l'alcalinité ont aussi été analysées en utilisant seulement les tournées 10 à 30 (donc provenant uniquement du laboratoire de Longueuil). Ceci a permis de faire ressortir une tendance positive supplémentaire (lac 302). Celle-ci est demeurée significative après désaisonnalisation de la série (tableau 8).

Cinq des douze lacs de l'étude ont montré des tendances dans les sulfates. Une de ces séries (lac 202) présente une tendance croissante tandis que les quatre autres (appartenant aux régions 4 & 5 du réseau) ont des tendances décroissantes. Le lac 202 (lac Lemaine) est situé à l'est du territoire à l'étude tandis que les lacs des régions 4 & 5 se situent dans la partie ouest du réseau.

Pour ce qui est des nitrates, les six tendances perçues sont croissantes (lacs 102, 201, 203, 301, 303 et 402). Après désaisonnalisation, seulement trois des tendances initiales demeurent significatives (lacs 102, 201 et 402). Ceci est probablement attribuable à la puissance des divers tests appliqués. Nous discuterons de ce point plus loin.

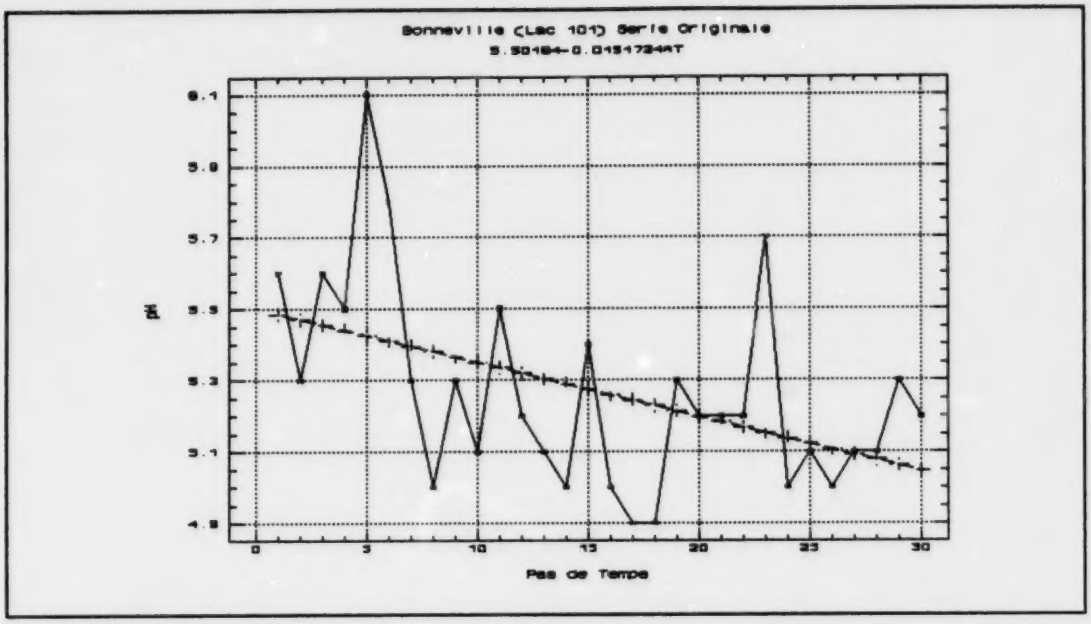
Dans le cas de la somme des cations, les trois tendances perçues sont positives (lacs 203, 302 et 502) même lorsque les deux séries avec composantes cycliques sont désaisonnalisées.

La conductivité présente trois séries à tendances positives (lacs 202, 203 et 302) deux desquelles ont des composantes cycliques (lacs 203 et 302). Ces tendances sont toujours significatives après désaisonnalisation des séries.

Dans le cas de la silice, cinq des douze lacs ont des tendances significatives dont quatre positives (lacs 201, 202, 301 et 302) et une négative (lac 303). Après désaisonnalisation des séries, seulement trois des tendances initiales demeurent significatives (lacs 202, 302 et 303). Finalement, un seul lac présente une tendance pour l'aluminium (lac 401). Cette tendance est décroissante. L'aluminium est le seul paramètre de la présente étude qui n'a pas subi de changement de laboratoire.

Par complément d'information les séries sans tendances possédant des composantes cycliques ont aussi été décomposées (tableaux 9 et 10). De cette façon, quatre séries ont pu être identifiés avec des tendances significatives. Parmi ceux-ci notons les lacs 101 (tendance négative) et 202 (tendance positive) pour la somme des cations, le lac 302 pour l'alcalinité (tendance positive) et le lac 502 pour la silice (tendance négative). Le lac 302 possédait déjà une tendance lorsqu'analysé en utilisant les tournées #10 à 30. Le fait de désaisonnaliser avec une moyenne mobile classique semble affecter la détection de la tendance. La correction imposée par la méthode peut être trop grande dans les cas où les cycles saisonniers ne sont pas constants en termes d'amplitude d'une année à l'autre. Enfin, trois des variables du tableau 10 n'ont pu être vérifiées pour la signification de la tendance due à l'incapacité du logiciel à les incorporer pour analyse.

L'annexe 2 inclut l'ensemble des graphiques pour les séries présentant des tendances monotones significatives avec les résultats des régressions respectives. Les tendances fortes sont présentées aux figures 2 à 8. Le pH des lacs Bonneville et Lagou (101 et 102) a diminué de plus de 0,4 unité depuis 1983 (Tour 1) dans les



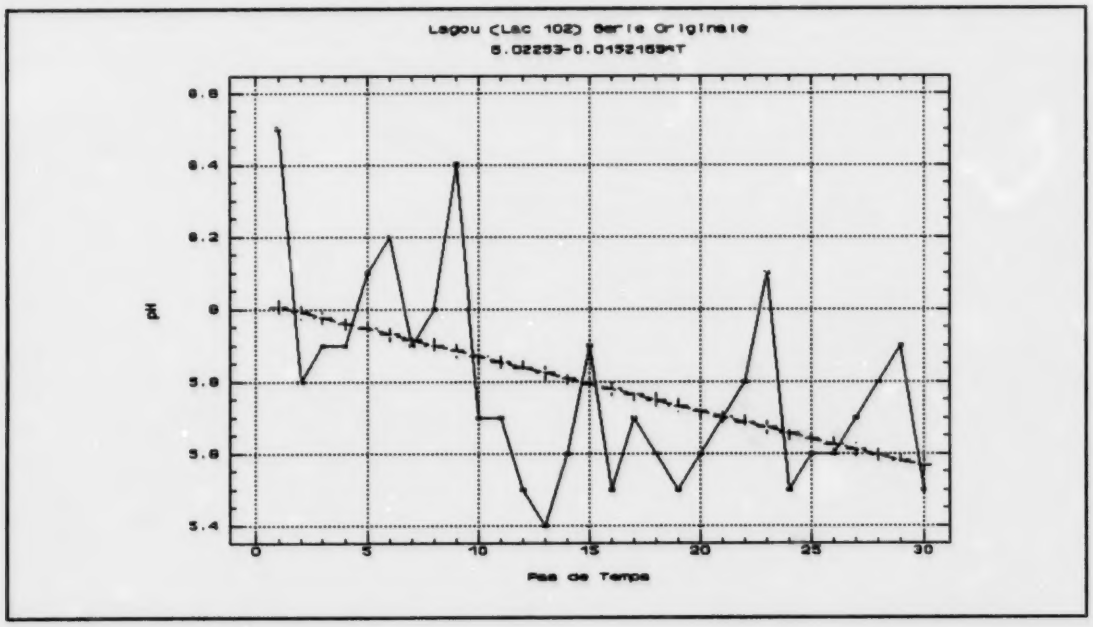
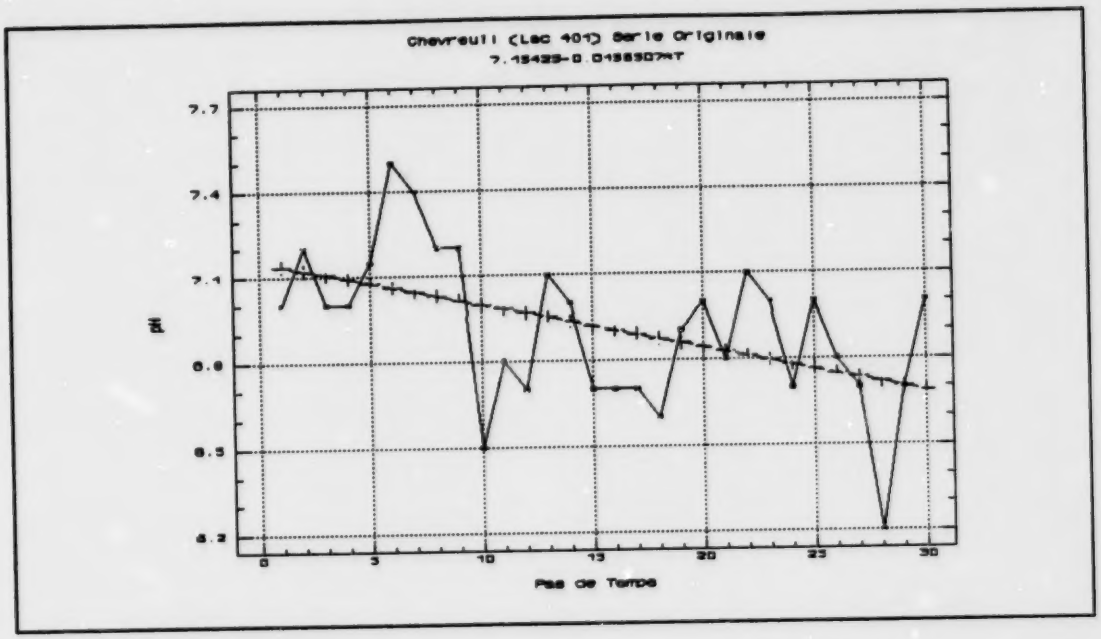


Figure 2 : Droites de régression - pH des lacs Bonneville et Lagou



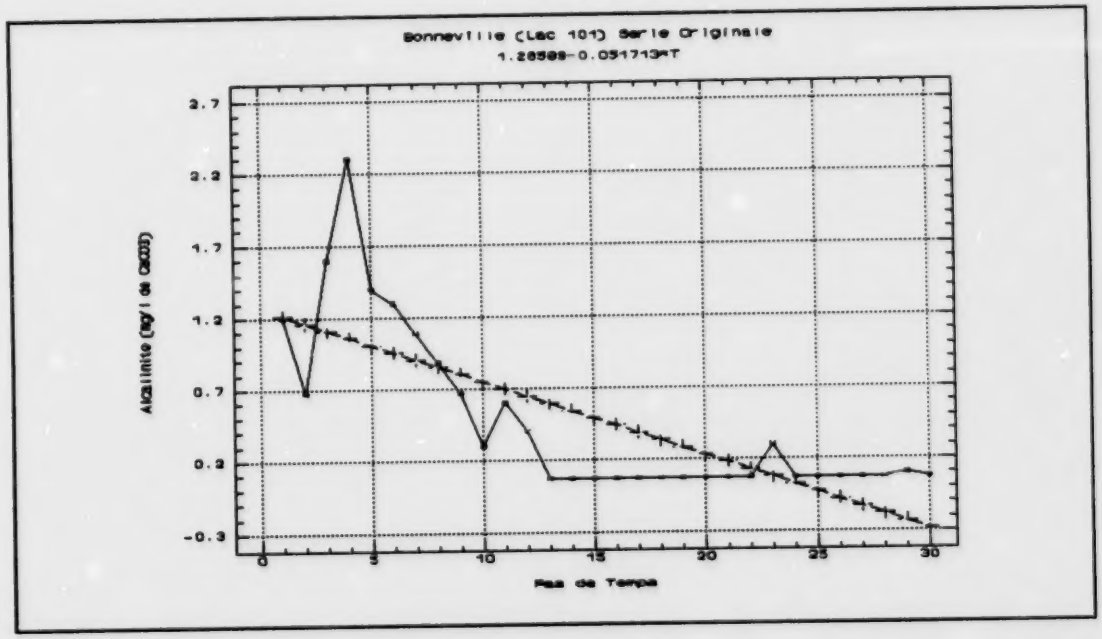
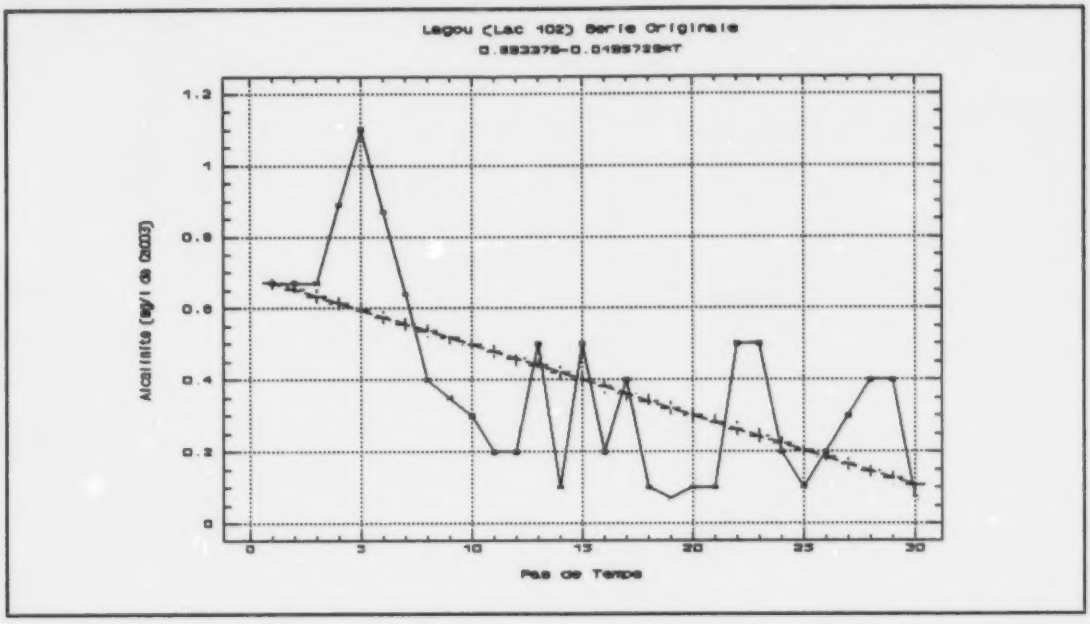


Figure 3 : Droites de régression - pH du lac Chevreuil et alcalinité du lac Bonneville.



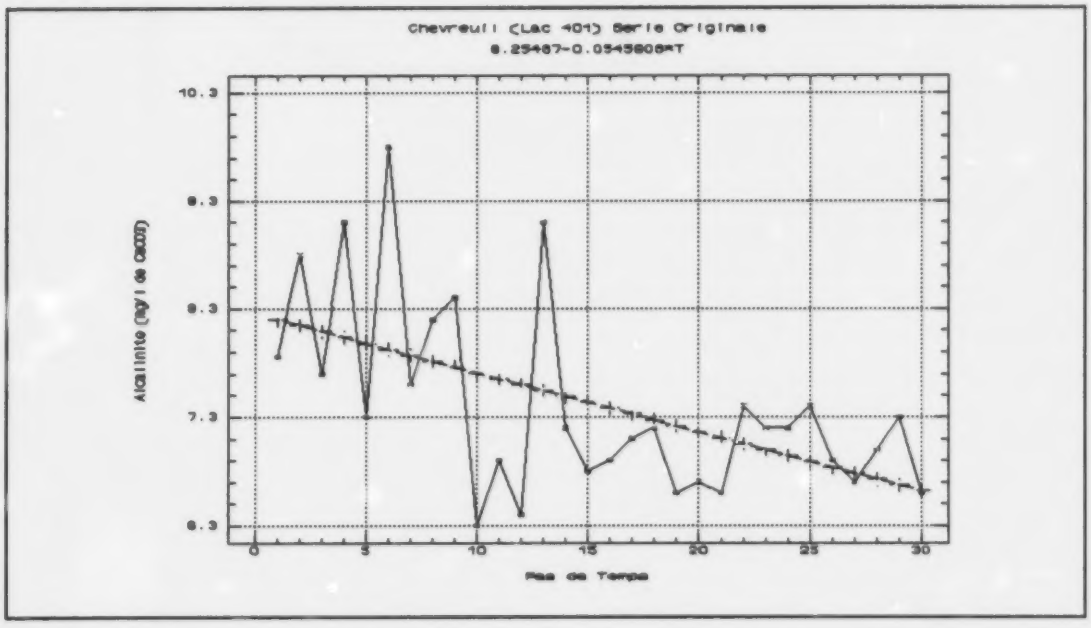
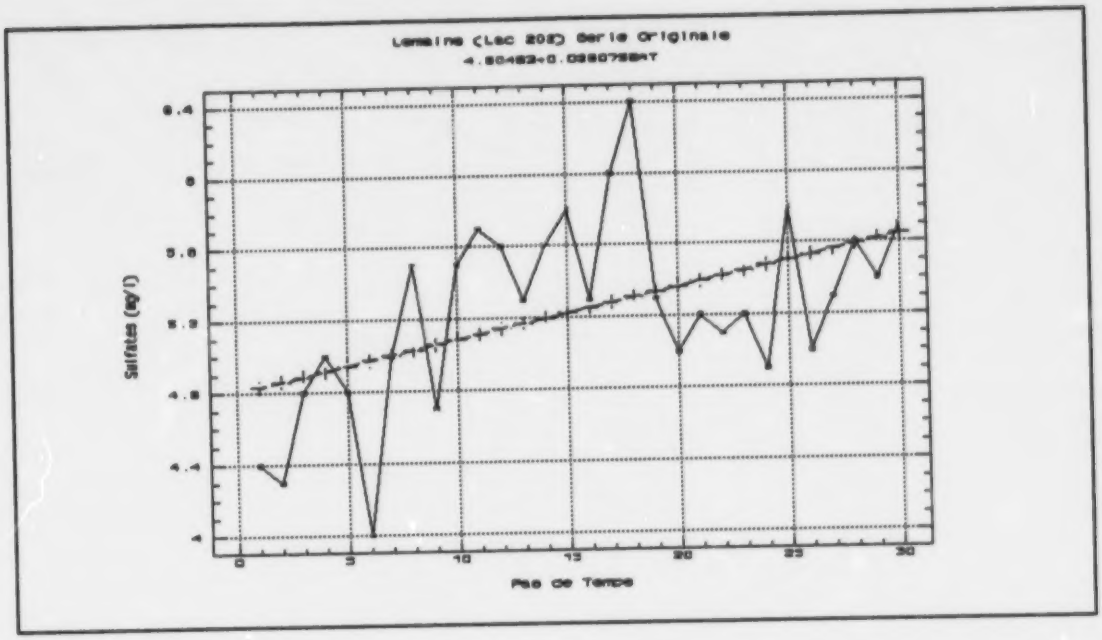


Figure 4 : Droites de régression - Alcalinité des lacs Lagou et Chevreuil



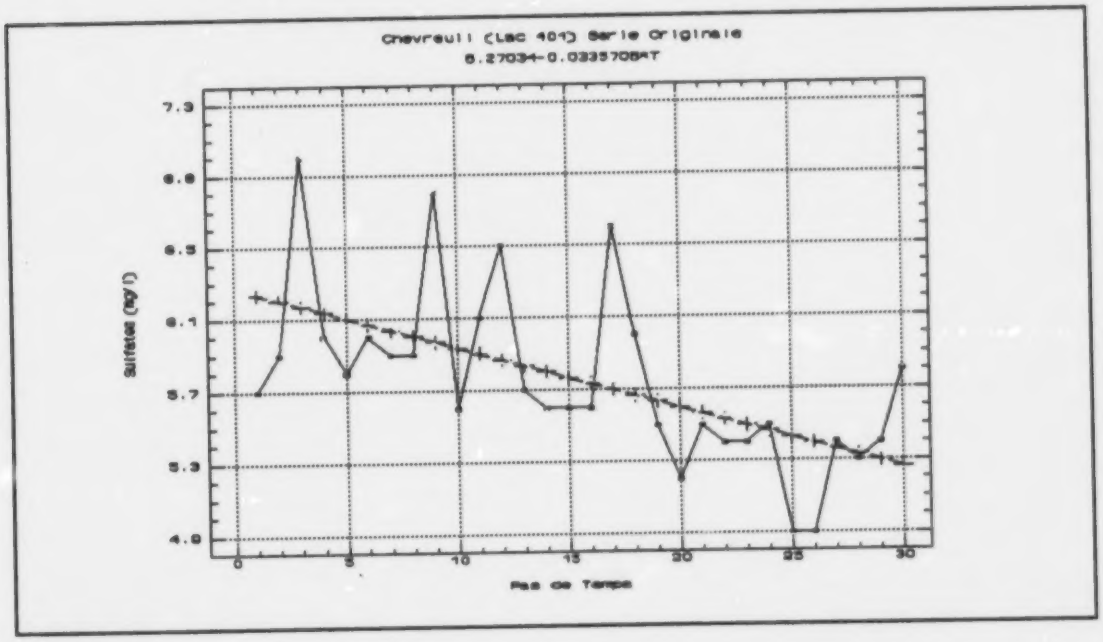
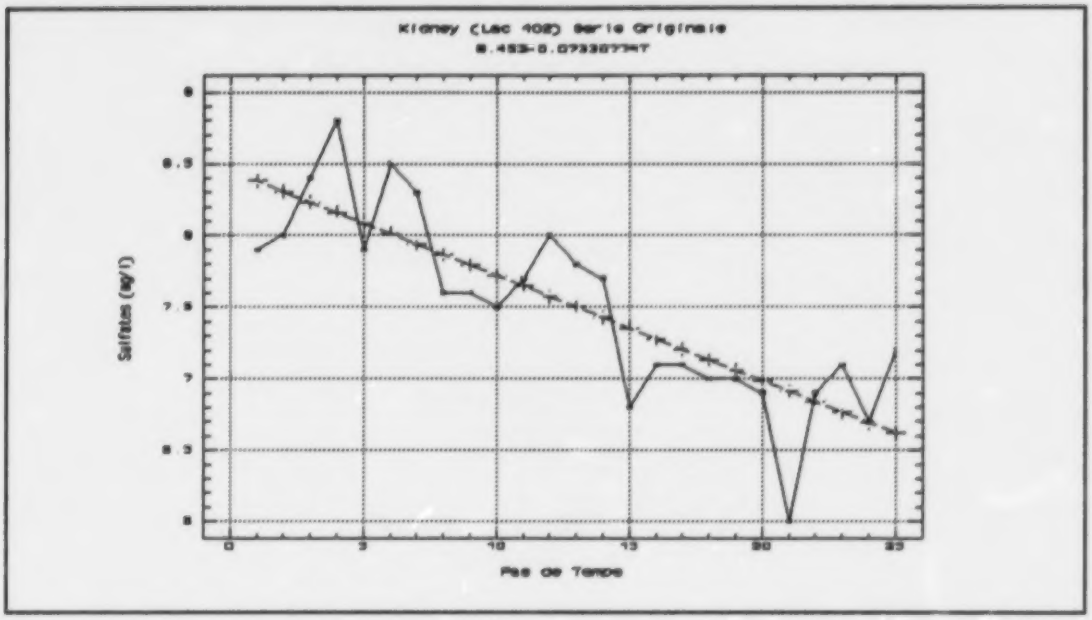


Figure 5 : Droites de régression - Sulfates des lacs Lemaine et Chevreuil



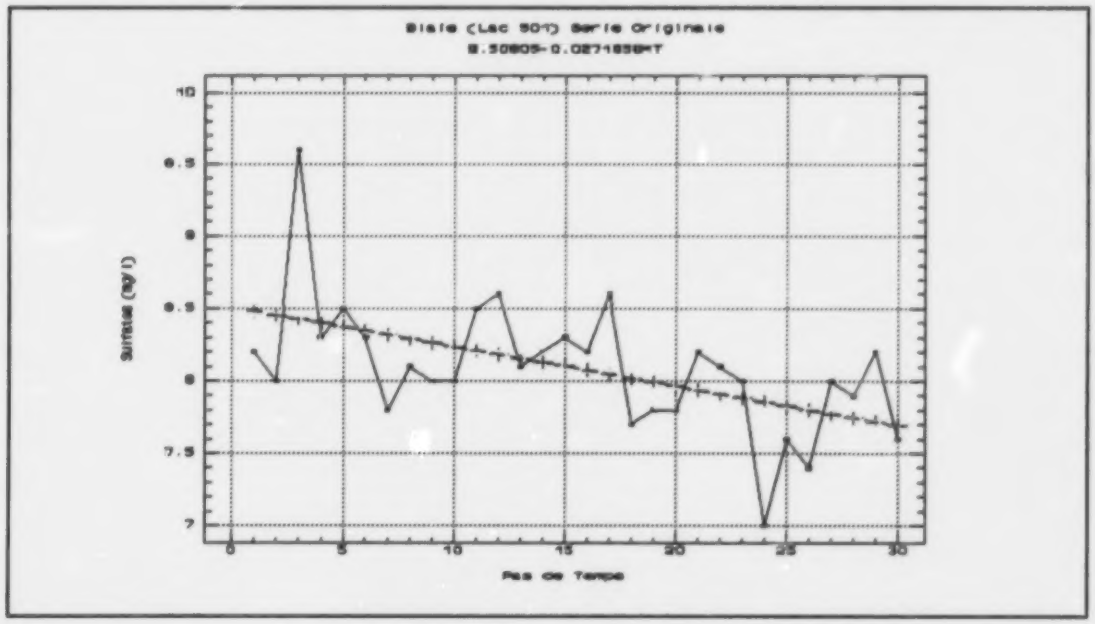
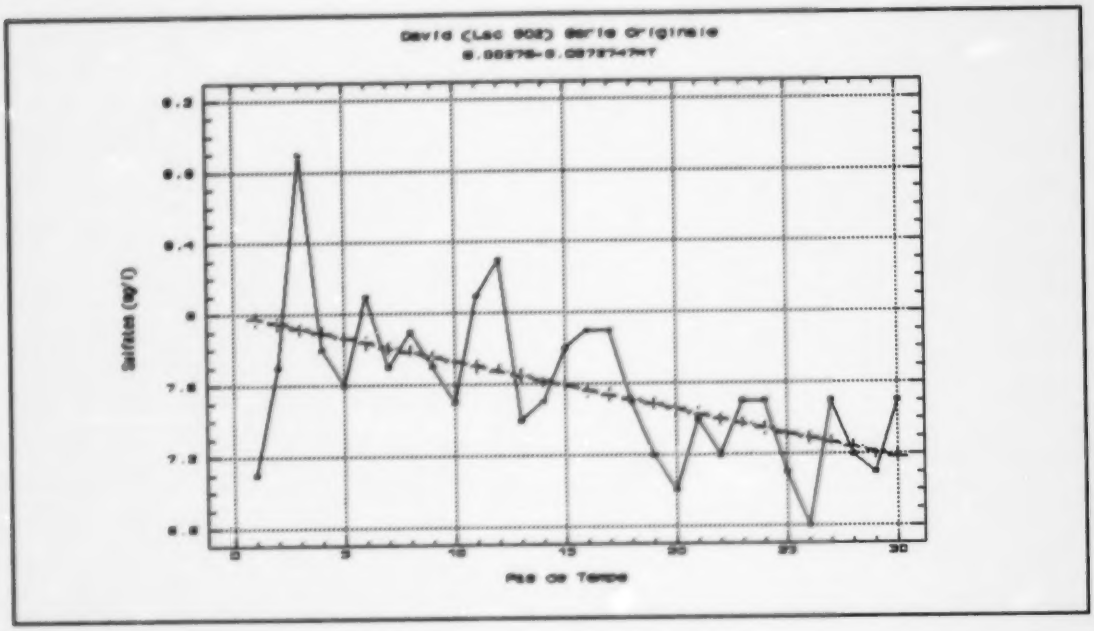


Figure 6 : Droites de régression - Sulfates des lacs Kidney et Blais



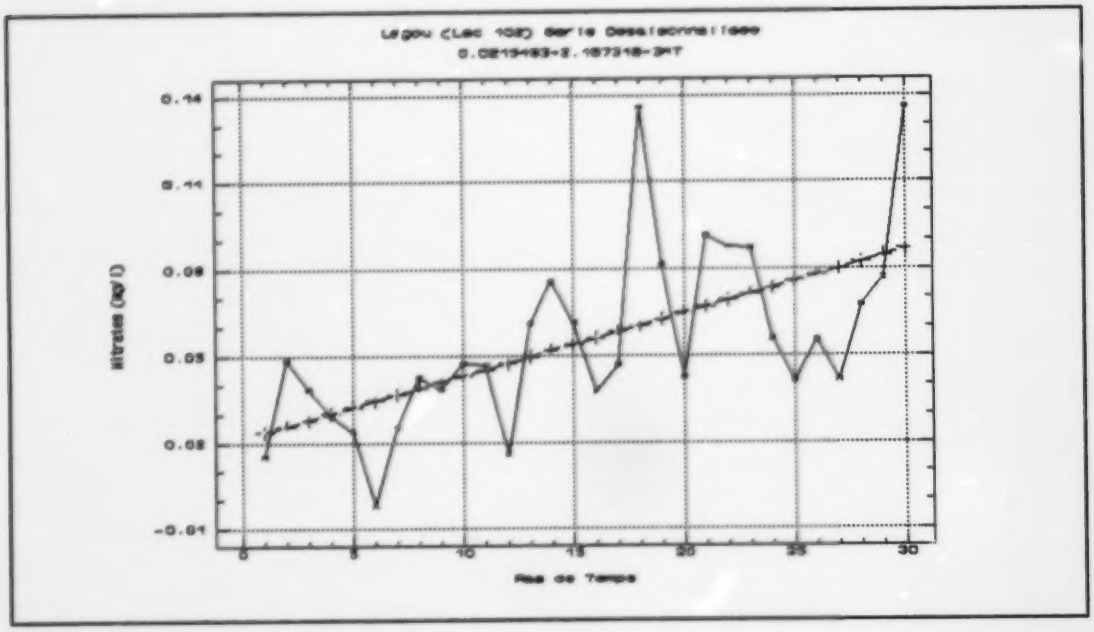
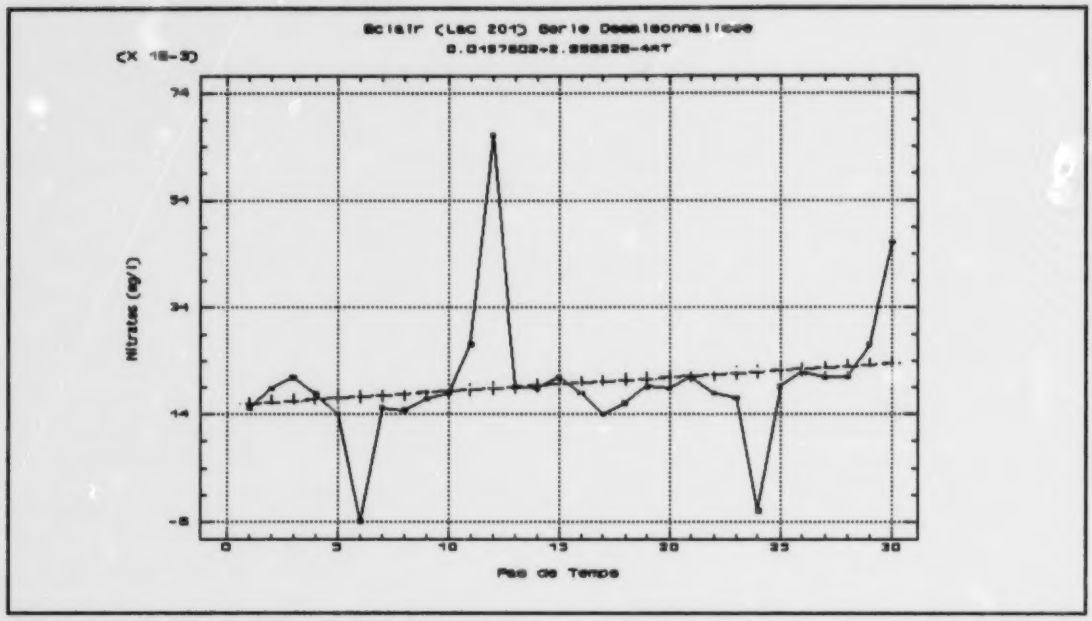


Figure 7 : Droites de régression - Sulfates du lac David et nitrates du lac Lagou



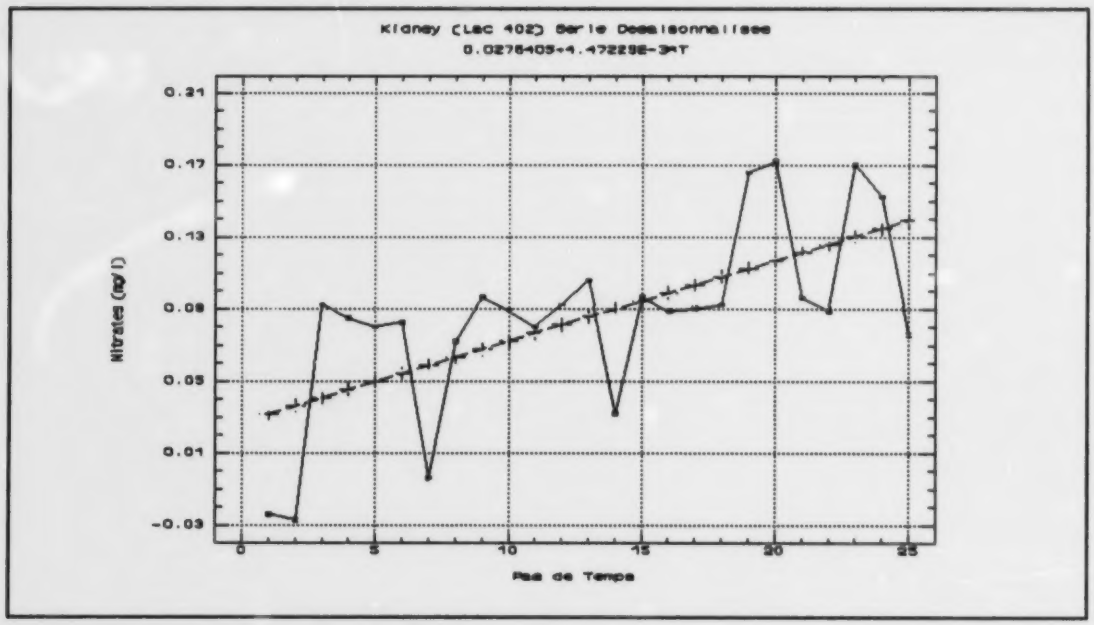


Figure 8 : Droites de régression - Nitrates des lacs Eclair et Kidney

deux cas. Le pH du lac Chevreuil (401) montre une baisse similaire. En termes de µéq/l les diminutions correspondent à 4,8 µéq/l pour le lac Bonneville (101), 1,5 µéq/l pour le lac Lagou (102) et 0,12 µéq/l pour le lac Chevreuil. Une étude paléolimnologique (Dixit et al., 1987) a montré que l'acidification des lacs Bonneville (101) et Lagou (102) a probablement commencé dans les années '40 pour le lac Bonneville et au début des années '70 pour le lac Lagou.

Ces trois tendances à la baisse dans le pH sont accompagnées de tendances correspondantes dans l'alcalinité (figures 3 et 4). Le lac Bonneville en particulier présente des valeurs sous la limite de détection (0,1 mg/l) depuis la tournée 12 (1985). Bien que le patron de variation des sulfates des lacs Bonneville et Lagou ressemble à celui du lac Lemaine (figure 5), il n'y a cependant pas de tendances significatives pour les séries de sulfates de ces deux lacs.

Les tendances détectées dans les sulfates montrent des diminutions pour les lacs des régions quatre et cinq (lacs 401, 402, 501 et 502) qui varient entre 1 et 2 mg/l et ce depuis 1983. Seul le lac Lemaine (202) montre une tendance à la hausse dans les sulfates mais le graphique de la figure 5 montre des valeurs plus basses depuis 1986 (tournée 18). La tendance décroissante dans les sulfates du lac Chevreuil (401) semble inconsistente dans le contexte d'acidification avec les séries de pH et d'alcalinité qui montrent des diminutions depuis 1983. L'examen du tableau 9 révèle que les séries de somme des cations, de conductivité et de silice qui représentent la minéralisation pour le lac Chevreuil (401) sont en légère décroissance. Cette diminution n'est pas significative statistiquement mais avec la minéralisation élevée du lac Chevreuil, elle indique probablement un phénomène de dilution pour ce lac.

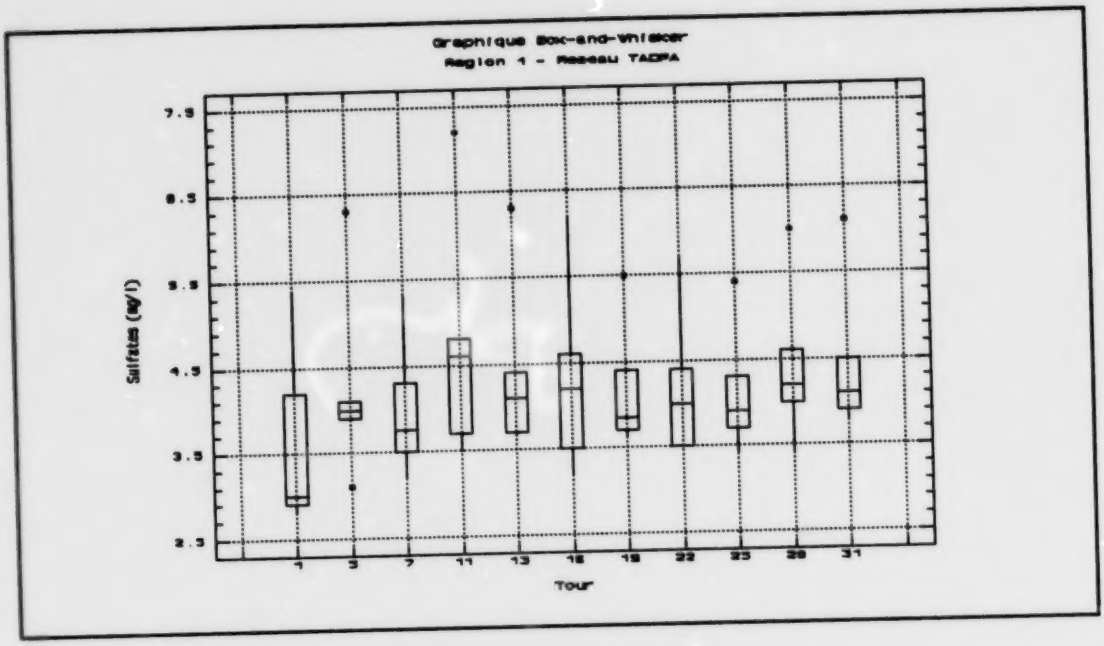
Pour les nitrates, après désaisonnalisation, seulement trois des six tendances trouvées au départ demeurent significatives comme mentionné plus tôt. Ce sont les séries de données correspondant aux lacs 102, 201 et 402 présentés aux figures 7 et 8.

iii) Caractérisation régionale et spatiale :

Afin d'interpréter les résultats des tendances individuelles, des graphiques du type "Box & Whisker" furent générés en utilisant l'ensemble des lacs du réseau lors des passes spatiales d'échantillonnage (deux fois par année). Quelques-uns de ceux-ci se situent dans les pages qui suivent (figures 9 à 12). Les tournées (tour) représentent de façon alternative des passes d'échantillonnage de fin-novembre et de fin-mai sauf pour les tournées #5 et #11 qui sont de passes de fin-janvier.

Pour les sulfates, les "Boxplots" montrent des tendances à l'augmentation dans les régions 1, 2 et 3 du réseau TADPA. Ceci se voit aussi sur les cartes de "SPANS" (logiciel d'analyse spatiale) à la figure 13. Même si l'intervalle utilisé est de 2 mg/l l'effet demeure très net. Quant aux regions 4 et 5, bien que les tendances individuelles soient à la baisse, ni les cartes de "SPANS", ni les "Boxplots" régionaux ne montrent de changements visibles.

En terme de pH, aucune tendance régionale ne ressort malgré les séries individuelles de la région 1 et l'étude paléolimnologique qui montrent des baisses de pH. Cette dernière étude montrait aussi des tendances à la baisse pour le pH dans les lacs 203 (à partir de 1965) et 301 (à partir de 1970) et une tendance à la hausse dans le lac 302 (à partir de 1960) qui est le lac le plus à l'est du réseau TADPA.



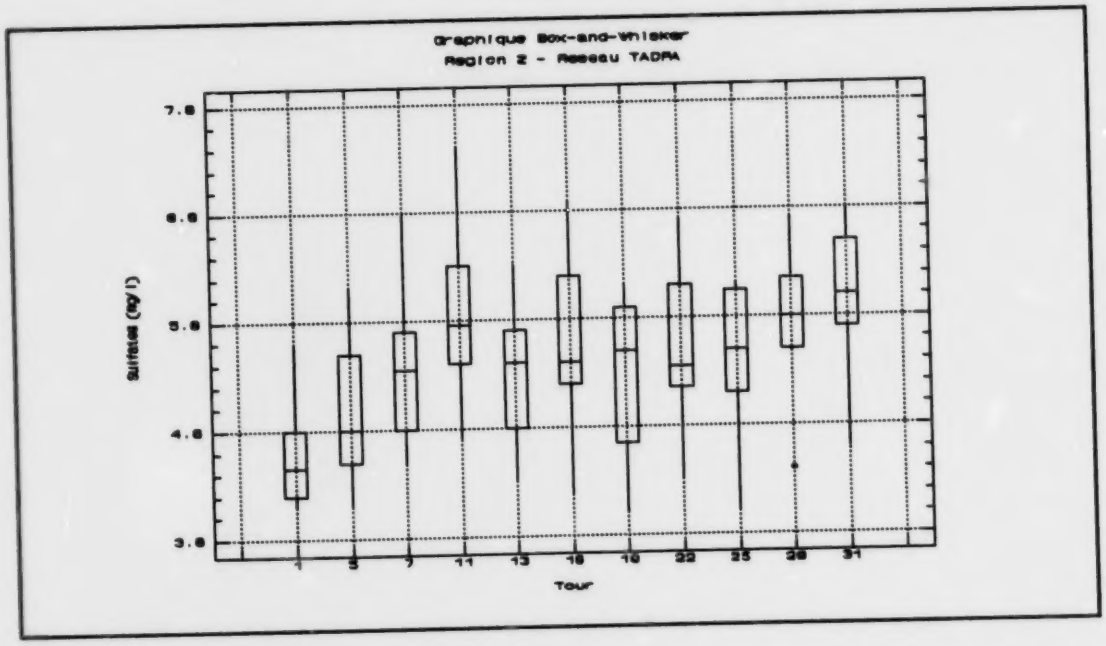
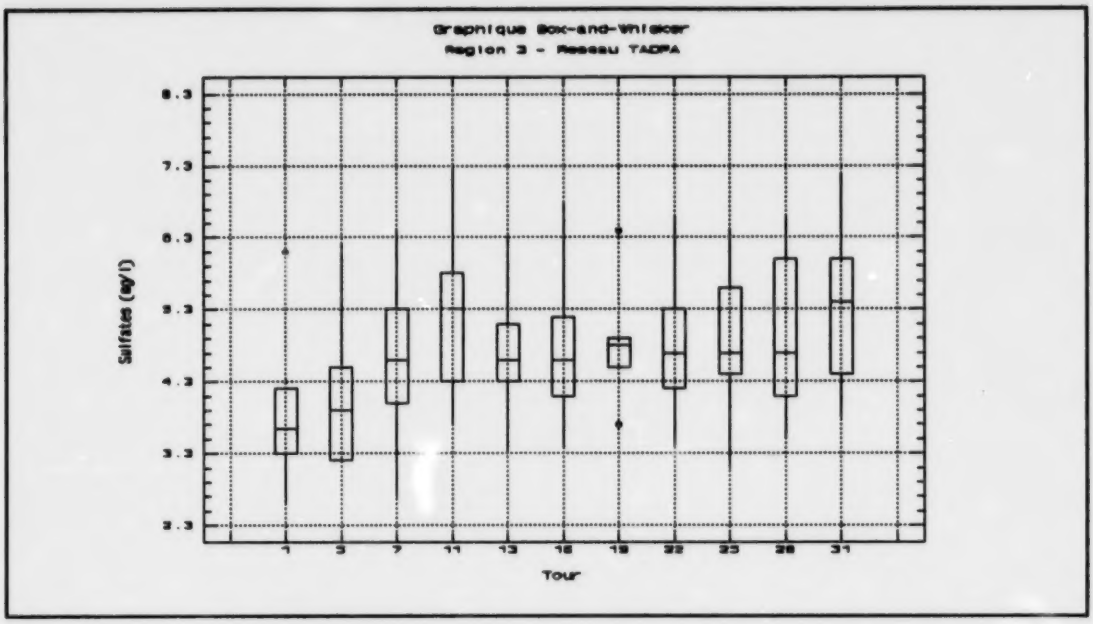


Figure 9 : Graphiques du type Box-and-Whisker pour les sulfates des régions 1 & 2 du réseau TADPA



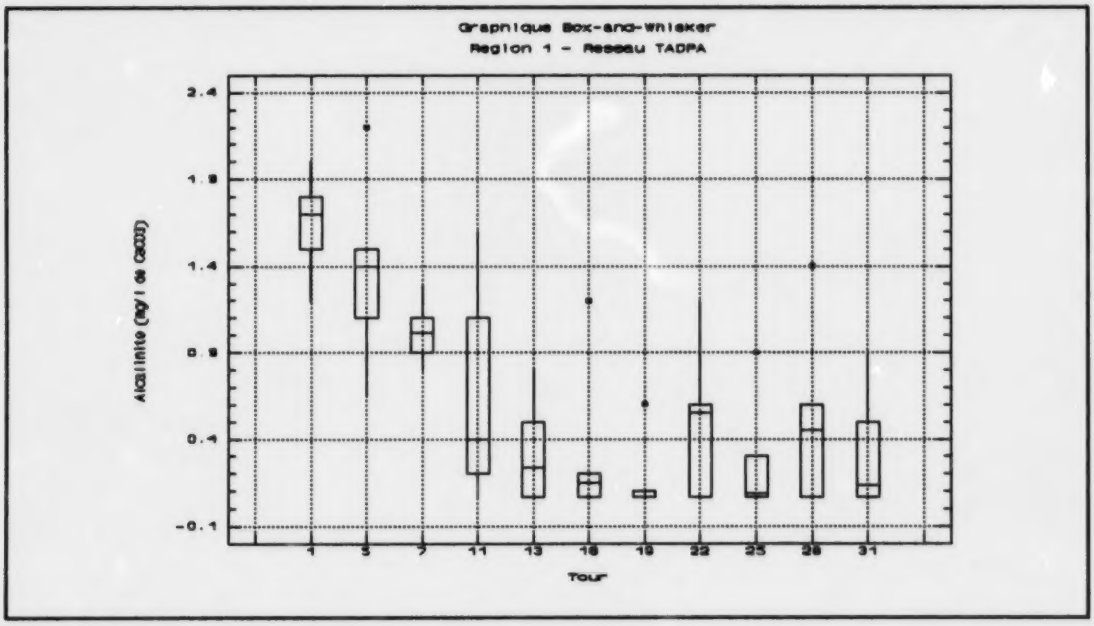
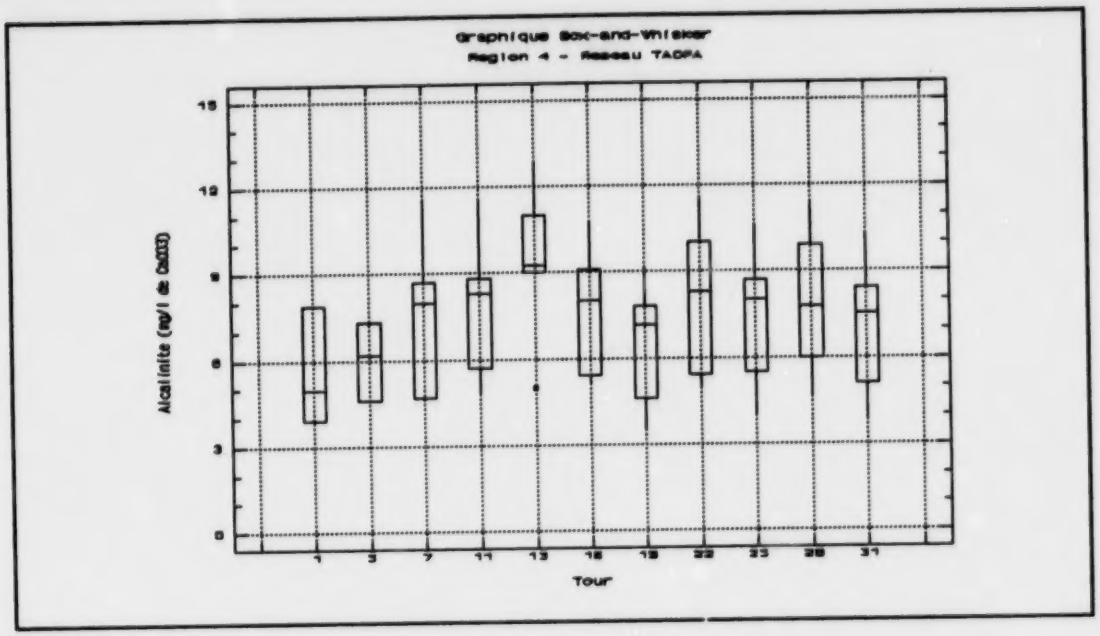


Figure 10 : Graphiques du type Box-and-Whisker pour les sulfates de la région 3 et l'alcalinité de la région 1 du réseau TADPA



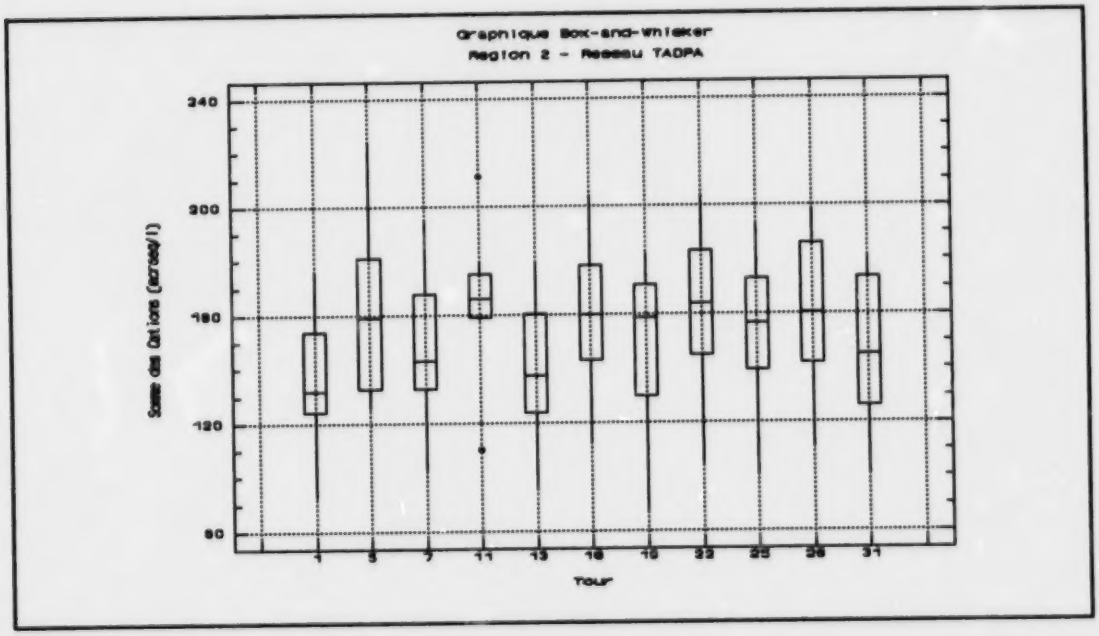


Figure 11 : Graphiques du type Box-and-Whisker pour l'alcalinité de la région 4 et la somme des cations de la région 2 du réseau TADPA

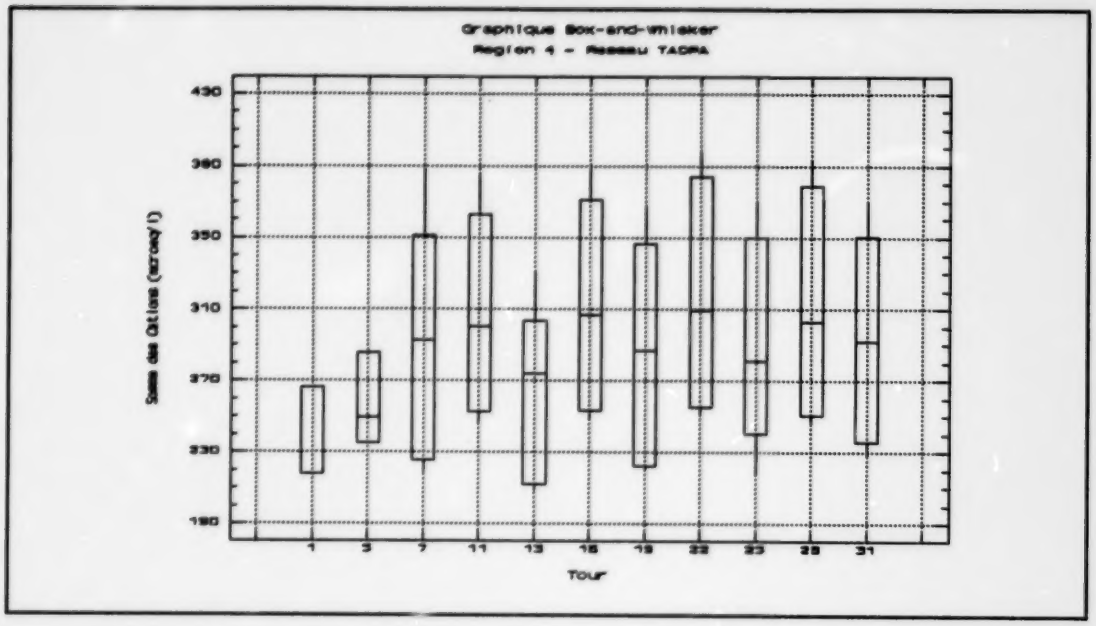


Figure 12 : Graphique du type Box-and-Whisker pour la somme des cations de la région 4 du réseau TADPA

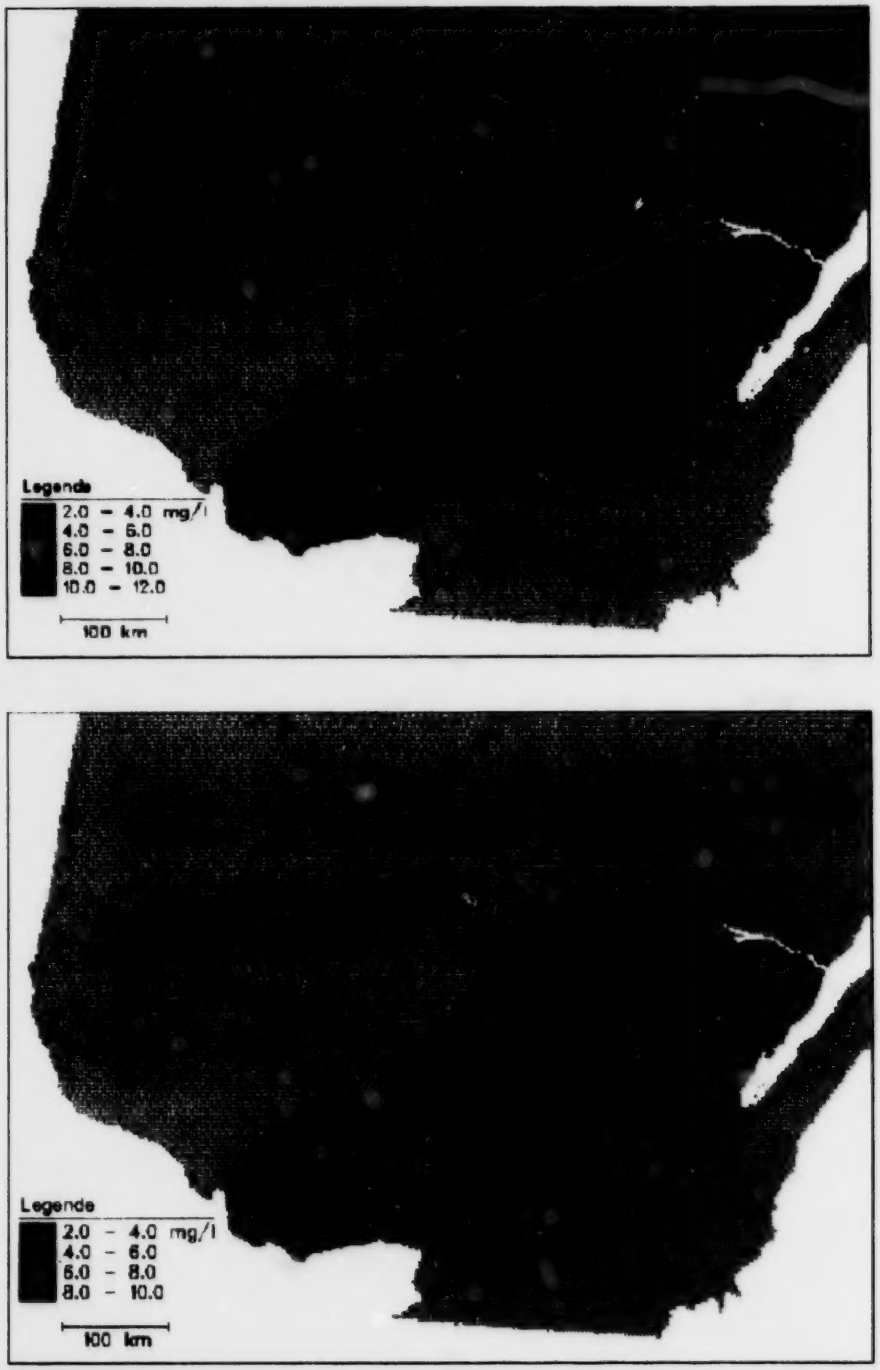


Figure 13 : Distribution spatiale des sulfates 1983-1988

Le graphique "Box & Whisker" de l'alcalinité montre une tendance régionale à la baisse dans la région 1 (figure 10) ce qui correspond bien avec les séries temporelles individuelles. L'accord est bon aussi avec la hausse regionale des sulfates et la baisse de pH au niveau des lacs temporels. Dans la région 4 (figure 11), il y a une légère tendance régionale à la hausse dans l'alcalinité. Ceci correspond bien avec les baisses de sulfates observées dans les séries temporelles individuelles pour les lacs 401 et 402. Un des lacs temporels montre cependant une tendance décroissante dans l'alcalinité.

Bien qu'il a été possible de détecter des tendances croissantes dans six des douze lacs du réseau (trois après désaisonnalisation) pour les nitrates, aucune tendance régionale n'a pu être détectée. Ce paramètre, qui fait partie du cycle biologique, est plus difficile à interpréter.

Quant à la somme des cations, les "Boxplots" régionaux montrent des tendances à la hausse dans les régions 2 (figure 11) et 4 (figure 12). Pour la région 2, deux des trois lacs temporels possèdent des tendances à la hausse significatives ce qui est en bon accord avec la tendance régionale. Ceci correspond bien aussi avec la hausse régionale des sulfates. Dans le cas de la région 4, la hausse régionale dans la somme des cations ne semble pas correspondre avec la baisse de sulfates observée dans les lacs temporels. Il n'y a cependant pas de tendance régionale pour les sulfates dans cette région.

La figure 14 présente le résumé des tendances principales (régionales & individuelles) identifiées dans le présent rapport. Cette figure suggère des tendances régionales à l'acidification dans les régions 1 et 2 et plus spécifiquement dans les lacs Bonneville (101), Lagou (102), et Lemaine (202). Les lacs Bonneville et Lagou montrent des baisses de pH et d'alcalinité tandis que les sulfates sont à la hausse au

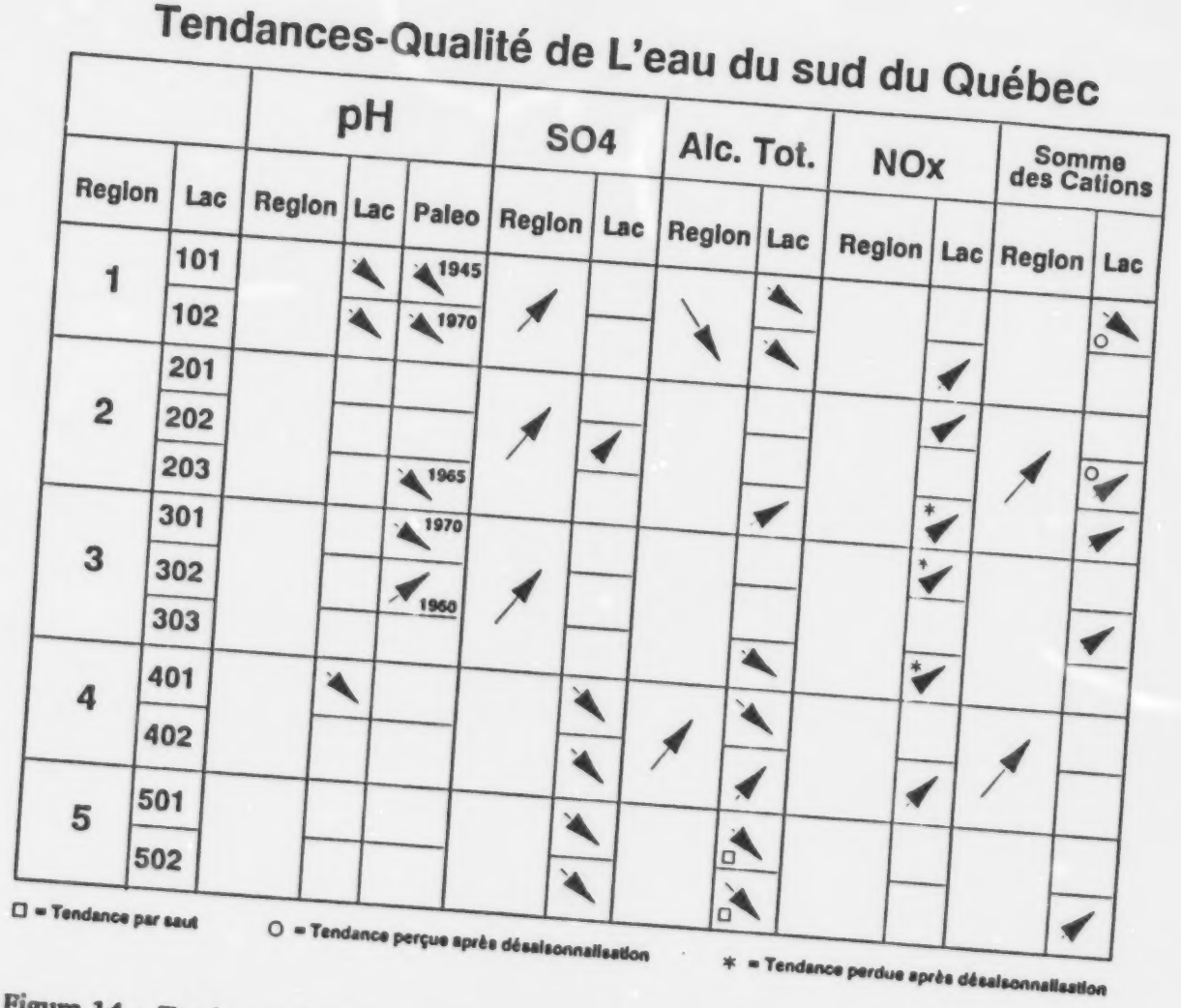


Figure 14 : Tendances dans la qualité de l'eau des lacs du sud du Québec

niveau régional. Dans le cas du lac Lemaine, la hausse des sulfates est accompagnée d'une hausse dans la somme des cations. La région 3 de son côté ne présente pas de tendances claires si ce n'est une augmentation régionale pour les sulfates.

Les régions 4 et 5 montrent des signes d'amélioration. Le lac Kidney (402) connait une nette amélioration avec une baisse des sulfates couplée à une hausse d'alcalinité. Le lac Chevreuil (401) montre plutôt un phénomène de dilution qui a déjà été mentionné auparavant. Les lacs Blais (501) et David (502) montrent des baisses nettes dans les sulfates avec des tendances par saut à la baisse dans l'alcalinité ce qui peut aussi laisser supposer un phénomène de dilution. Les comportements de ces lacs pourront être mieux définis avec des données supplémentaires surtout au niveau de l'alcalinité.

6) Discussion :

Un des objectifs du réseau TADPA-Québec était de détecter une tendance inférieure ou égale à l'écart type de la série des résidus après 5 à 7 ans pour un niveau de confiance et une puissance du test de 90%.

Le rapport présent ne porte que sur les cinq premières années d'échantillonnage ce qui, à première vue, ne semble pas très long face aux prévisions théoriques de Berryman et al. (1988) et de Lachance (1988).

Il devient alors intéressant d'examiner les rapports $Tr/\sigma e$ obtenus pour les diverses séries analysées à date. Ceux-ci se retrouvent aux figures 15 et 16 qui représentent les valeurs de $Tr/\sigma e$ trouvées ainsi que les divers tests de détection de

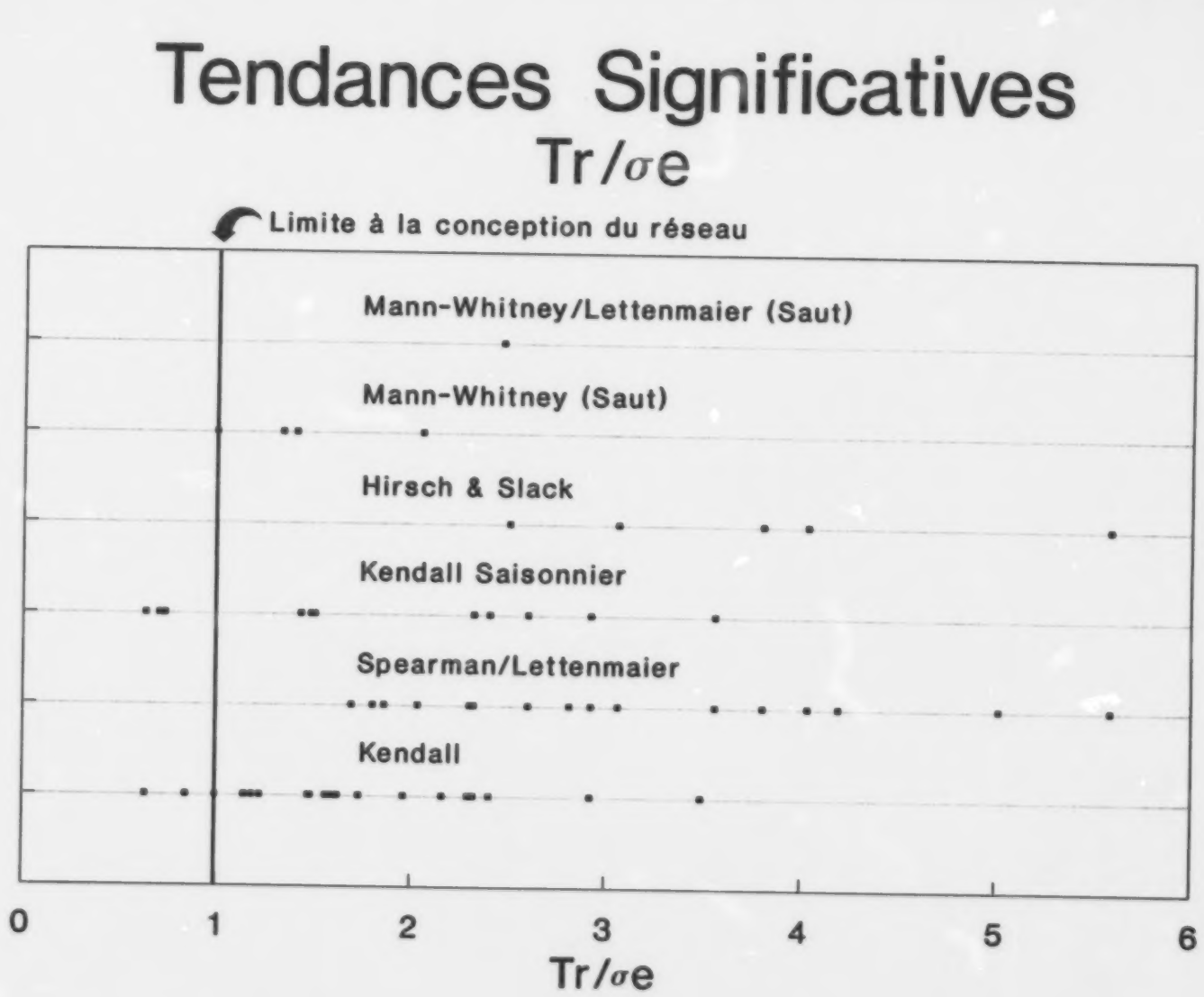


Figure 15 : Graphique des tendances significatives par test statistique

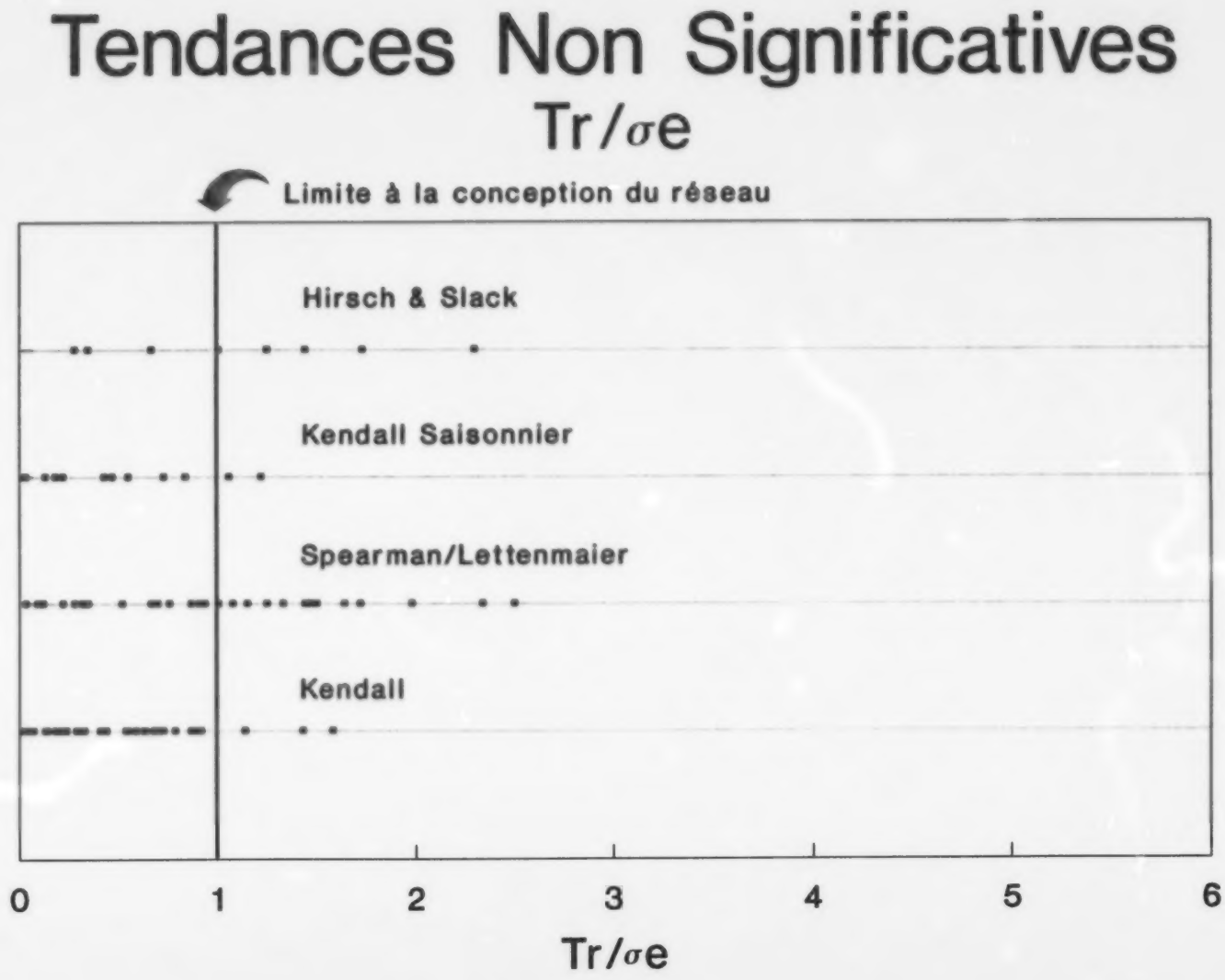


Figure 16 : Graphique des tendances non significatives par test statistique

tendances appliqués. Le premier graphique comprend les points relatifs aux séries chronologiques ayant présenté des tendances significatives alors que le deuxième se rapporte aux séries sans tendances significatives.

La figure 15 démontre que pour les séries dépourvues de persistance et de saisonnalité (test de Kendall), il a été possible de détecter des tendances plus fines que la limite de $Tr/\sigma e=1$.

Les séries possédant de la saisonnalité mais n'ayant pas de persistance (test de Kendall saisonnier) montrent des résultats similaires c'est-à-dire qu'il a été possible de détecter des tendances significatives avec des séries possédant des rapports $Tr/\sigma e$ aussi bas que 0,63.

Les séries possédant de la persistance (dépendance entre les observations) mais n'ayant pas de saisonnalité (test de Spearman/Lettenmaier) présentent des tendances significatives avec des valeurs de $Tr/\sigma e$ supérieures à 1,5.

Pour ce qui est des séries possédant de la persistance et de la saisonnalité (test de Hirsch et Slack), seules les tendances avec des rapports $Tr/\sigma e$ supérieurs à 2,5 ont pu être détectées de façon significative.

La figure 16 (séries sans tendances significatives) montre certains points intéressants notamment pour les tests de Kendall saisonnier, de Spearman/Lettenmaier et de Kendall. Des séries de données possédant des valeurs élevées au niveau du rapport $Tr/\sigma e$ n'ont tout de même pas été acceptées comme étant significatives au niveau des divers tests de détection de tendances. Pour le test de Kendall saisonnier par exemple, là où des séries avec des valeurs de $Tr/\sigma e$ aussi basses que 0,63 avaient des tendances significatives, il existe d'autres séries avec des $Tr/\sigma e$ plus grands que

l'unité et qui ne possédent pas pour autant de tendances statistiquement acceptables. Le scénario est le même pour le test de Kendall ainsi que le test de Spearman/ Lettenmaier sauf que pour ce dernier la valeur la plus basse de Tr/σe pour une série de données à tendance significative trouvée à date a été de 1,69.

Afin d'expliquer ce phénomène, le nombre effectif d'observations a été calculé pour les tendances non significatives avec Tr/σe élevé. Il a été calculé aussi pour certaines séries avec tendances significatives et ce pour fins de comparaisons. Les résultats de ces calculs n'étant pas complets à date, ils seront présentés dans un rapport futur. Les calculs effectués jusqu'ici ont donc été faits à l'aide de l'équation suivante tirée de Lachance (1988).

$$1/n^* = 1/n + 2/n^2 \sum^{n-1} (n-p)\, r_p$$

où, r_p = l'estimé du coefficient d'autocorrélation r d'ordre p.
n = nombre total d'observations.
p = nombre de coefficients.
n^* = nombre effectif d'observations.

Les coefficients d'autocorrélation utilisés (r_p) sont, tout comme dans Lachance (1988), les p coefficients positifs différents de 0. Ces coefficients sont calculés sur les séries rendues stationnaires c'est-à-dire que les composantes cycliques et tendance ont été enlevées de façon successive.

De façon globale les calculs montrent que le nombre effectif d'observations explique une partie des écarts obtenus. Certaines séries chronologiques ayant de hautes valeurs de Tr/σe sans toutefois posséder de tendances significatives avaient des nombres effectifs d'observations plus bas. Ceci influence la puissance du test utilisé

(puissance plus faible) et donc des tendances effectivement détectées. On pourra retrouver à l'annexe 3 les fiches relatives aux tests utilisés par DETECT.

En termes de puissance, les tests de Kendall et de Kendall saisonnier sont plus puissants que les tests de Spearman/Lettenmaier et de Hirsch et Slack. Le tableau 1 donne la puissance du test de Kendall. La mesure utilisée dans ce tableau est l'efficacité asymptotique relative qui se définit comme étant l'efficacité d'un test donné par rapport à un test de référence lorsque le nombre d'observations du test à comparer est élevé.

Pour ce qui est des autres tendances non significatives avec saisonnalité et démontrant des Tr/σe élevés, il peut arriver que la méthode de désaisonnalisation au moyen d'une moyenne mobile puisse causer des écarts importants lorsque les cycles saisonniers varient en intensité d'une année à l'autre. La correction dans ce cas est probablement trop forte. C'est le cas notamment des nitrates qui sont fortement affectés par l'activité biologique.

En résumé, il est facile de voir qu'un nombre plus considérable d'observations est préférable surtout dans l'optique de la détection d'une tendance égale à l'écart type de la série des résidus. Cependant, suite à l'évaluation des Tr/σe des diverses séries, les résultats obtenus sont quand même bons. Quelques séries sont plus difficiles à interpréter mais ceci s'explique surtout par la dépendance qui peut exister entre les observations. Le phénomène de persistance fait en sorte qu'il est préférable d'attendre pour des séries de données plus longues afin de tirer des conclusions.

7) Conclusion :

Suite à l'analyse de détection de tendances à l'aide de tests non-paramétriques sur les cinq premières années de données de qualité de l'eau du réseau TADPA-Québec, il a été possible de détecter de fortes tendances pour les lacs temporels notamment pour le pH où trois des douze lacs analysés possèdent des tendances à la baisse dont les deux lacs de la région 1. Les sulfates de l'eau des lacs temporels appartenant aux régions 4 et 5 du réseau ont diminué significativement. Seul un lac connait une augmentation significative des sulfates soit le lac Lemaine (202). L'alcalinité montre des tendances dans six des douze lacs, quatre desquelles sont à la baisse, les deux autres étant à la hausse. Les six tendances détectées pour les nitrates sont à la hausse de même que quatre des cinq tendances détectées pour la somme des cations.

Aucune tendance régionale n'a été trouvée pour le pH mais les tendances détectées dans les deux lacs de la région 1 correspondent bien avec les résultats d'une étude paléolimnologique sur les douze lacs temporels. Cette étude montre aussi des tendances à l'acidification pour deux autres lacs situés à l'est du Mont-Tremblant. Les sulfates dans l'eau montrent des tendances régionales à la hausse dans les régions 1, 2 et 3 du réseau. Il ne semble pas y avoir de tendance régionale dans les régions 4 et 5 alors que les séries individuelles montrent des diminutions appréciables. L'alcalinité montre une tendance régionale à la baisse pour la région 1 ainsi qu'une augmentation régionale pour la région 4. Les nitrates ne montrent pas de tendances régionales tandis que la somme des cations présente des augmentations régionales pour les régions 2 et 4.

Les résultats indiquent des tendances à l'acidification dans les régions 1 et 2 du réseau TADPA. Ces régions correspondent à la partie est du territoire couvert. Les

lacs Bonneville (101), Lagou (102) et Lemaine (202) montrent des signes évidents d'acidification. Les régions 4 et 5 qui couvrent la partie ouest du réseau sont plutôt en période d'amélioration. Le lac Kidney (402) en est un bon exemple. Le comportement des deux lacs temporels de la région 5 qui est similaire à celui du lac Chevreuil (401) semble indiquer des phénomènes de dilution mais l'insuffisance de données ne permet pas de conclure à ce sujet.

L'examen des rapports Tr/σe montre que dans l'ensemble, les objectifs statistiques de départ sont atteints. Pour les séries de données sans persistance ou saisonnalité, il a été possible de détecter des tendances inférieures à la limite fixée de Tr/σe=1. Le même scénario se présente pour les séries possédant de la saisonnalité mais n'ayant pas de persistance.

Dans le cas de séries ne possédant pas de saisonnalité mais ayant de la persistance, il n'a pas été possible de détecter des tendances ayant un Tr/σe inférieur à 1,5. Le cas est similaire pour les séries possédant et de la saisonnalité et de la persistance où il n'a été possible de détecter que des tendances ayant des Tr/σe supérieurs à 2,5.

Parmi les tests utilisés, ce sont ceux de Kendall et de Kendall saisonnier qui sont les plus puissants. Il n'en demeure pas moins qu'un nombre supérieur d'observations surtout dans le cas où il existe de la dépendance entre les observations (persistance) augmente d'autant la puissance des tests de détection de tendances.

Une analyse prochaine avec sept ans de données pourra éclaircir ou préciser certains points du présent rapport. Entres autres, l'étape suivante serait la modélisation des principales séries à l'aide des modèles de type ARIMA.

Bibliographie

1) Bobée, B., M. Lachance, J. Haemmerli, A. Tessier, J.Y. Charette, J. Kramer, 1983. Evaluation de la sensibilité à l'acidification des lacs du sud du Québec et incidences sur le réseau d'acquisition de données. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 203 p.

2) Berryman, D., 1984. Caractéristiques statistiques des séries temporelles du lac Laflamme et incidences sur l'opération du réseau TADPA de détection des des tendances dans l'acidification des eaux de surface. Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région du Québec. 48 p.

3) Berryman, D., B. Bobée, D. Cluis, J. Haemmerli, 1988. Non parametric tests for trend detection in water quality time-series. Water Resources Bulletin 24(1).

4) Cluis, D.A., Laberge, C., Houle, C., 1988. Détection des tendances et dépassement de normes en qualité de l'eau. INRS-Eau, 127 p.

5) Dixit, S.S., A.S. Dixit, R.D. Evans, 1987. Paleolimnological study of LRTAP network lakes, Québec region. Université Trent pour Environnement Canada, Direction des eaux intérieures et des terres, région du Québec, 199p.

6) Haemmerli, J., 1988. Réseau TADPA-Québec banque de données physico-chimiques 1983-1988. Environnement Canada, Conservation et Protection, Direction des eaux intérieures, région du Québec, 24 p. + 1 annexe.

7) Lachance, M., 1988. Elaboration d'une méthodologie d'évaluation de la qualité de l'eau: application au problème de l'acidification des eaux lacustres du Québec. Thèse de Doctorat présentée à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 264 p. + 2 annexes.

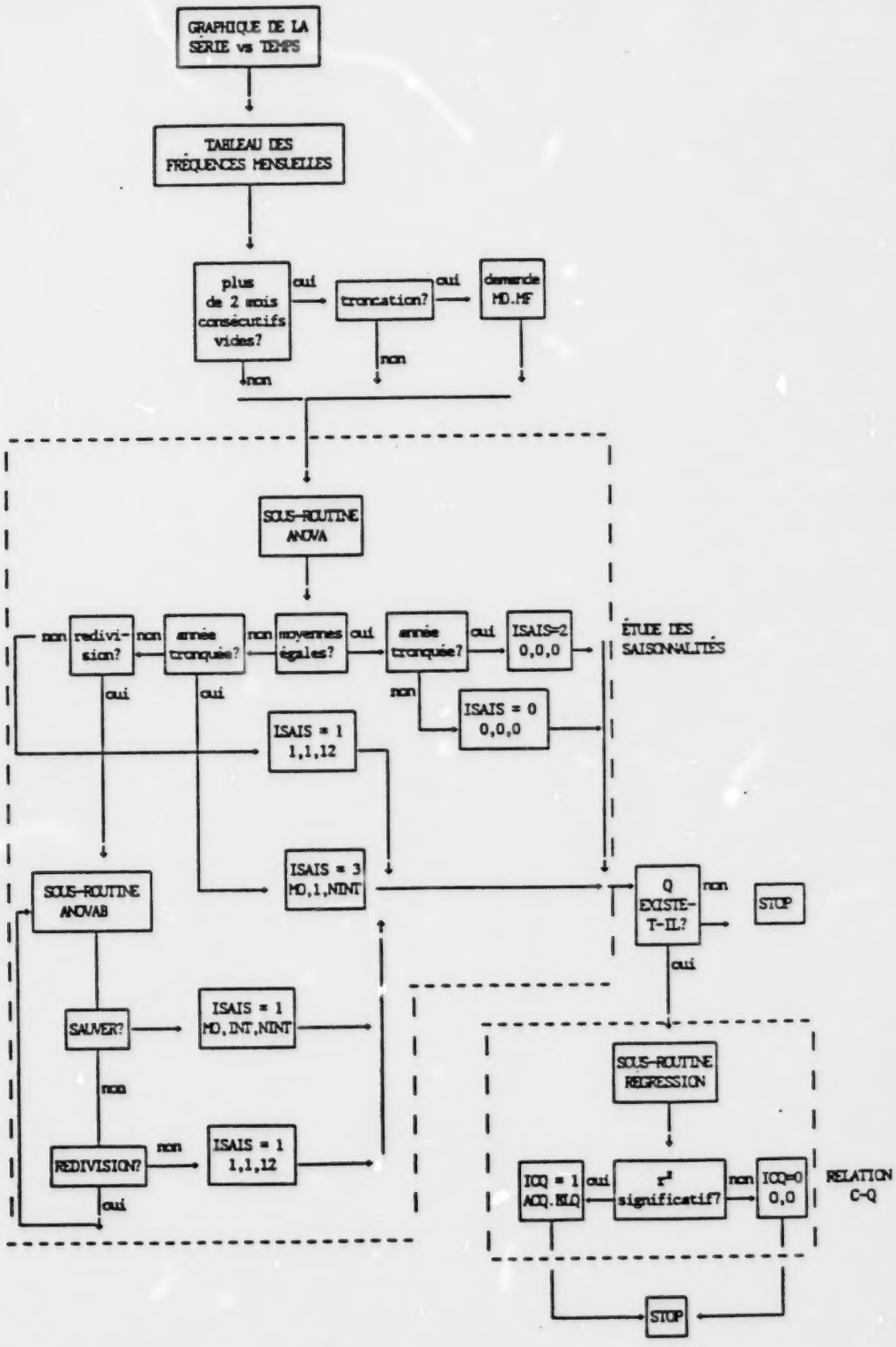
8) Lettenmaier, D.P., Burges, S.J., 1977. Design of Trend Monitoring Networks. JEED, proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 103, No. EE5, pp. 785-802.

Annexe 1

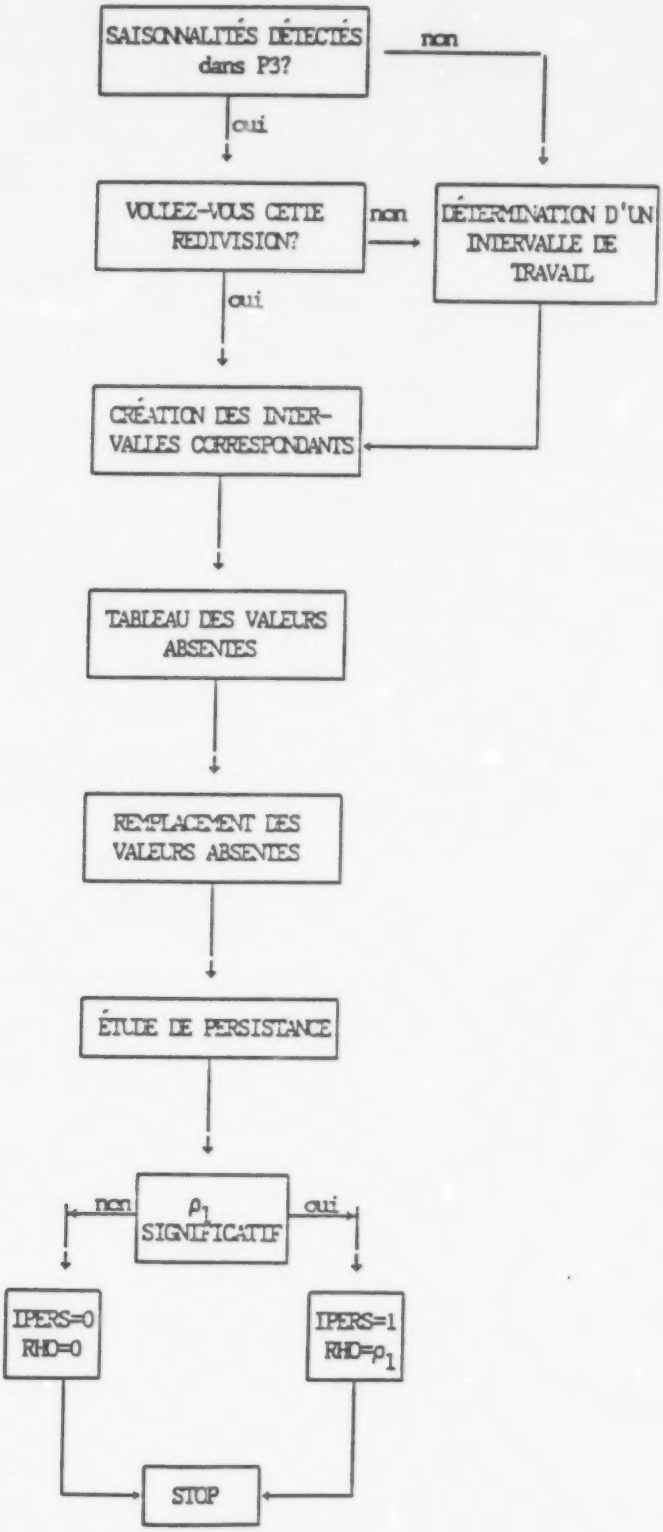
Etapes de fonctionnement du logiciel DETECT

Source : Cluis et al, 1988

7.1 Organigramme du programme P3.EXE



8.1 Organigramme du programme P4.EXE



9. Préparation aux tests (P5.EXE)

Ce programme rassemble toutes les caractéristiques de la série de travail mises en évidence précédemment: intervalle, saisonnalité, persistance, longueur, etc.

Il s'informe ensuite de la partie de série à traiter, de la recherche d'une tendance monotone ou par saut et suggère un test selon l'arbre de décision suivant:

ARBRE DE DÉCISION

TENDANCE	PERSISTANCE	SAISONNALITÉ	TEST APPROPRIÉ
Tendance → monotone	Persistance markovienne	- pas de saison	Lettenmaier/Spearman
		- avec saisons	Hirsch et Slack
	Pas de persistance	- pas de saison	Spearman/Kendall
		- avec saisons	Kendall saisonnier
Tendance → par saut	Persistance markovienne	- pas de saison	Lettenmaier/Mann-Whitney
		- avec saisons	Hirsch et Slack
	Pas de persistance	- pas de saison	Mann-Whitney
		- avec saisons	Kendall saisonnier

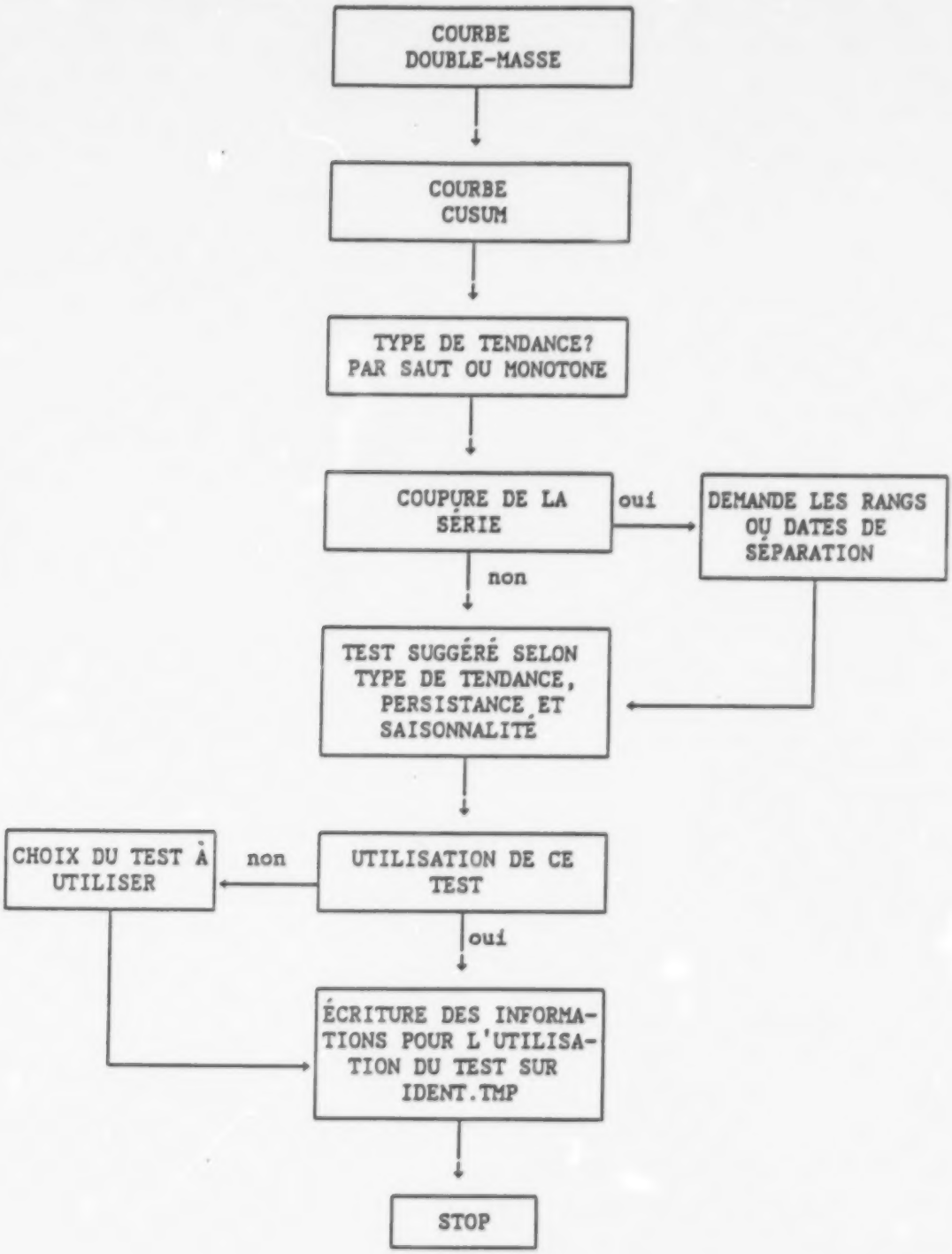
Le test choisi par l'usager est effectué et ses résultats sont présentés.

GÉNÉRALITÉS

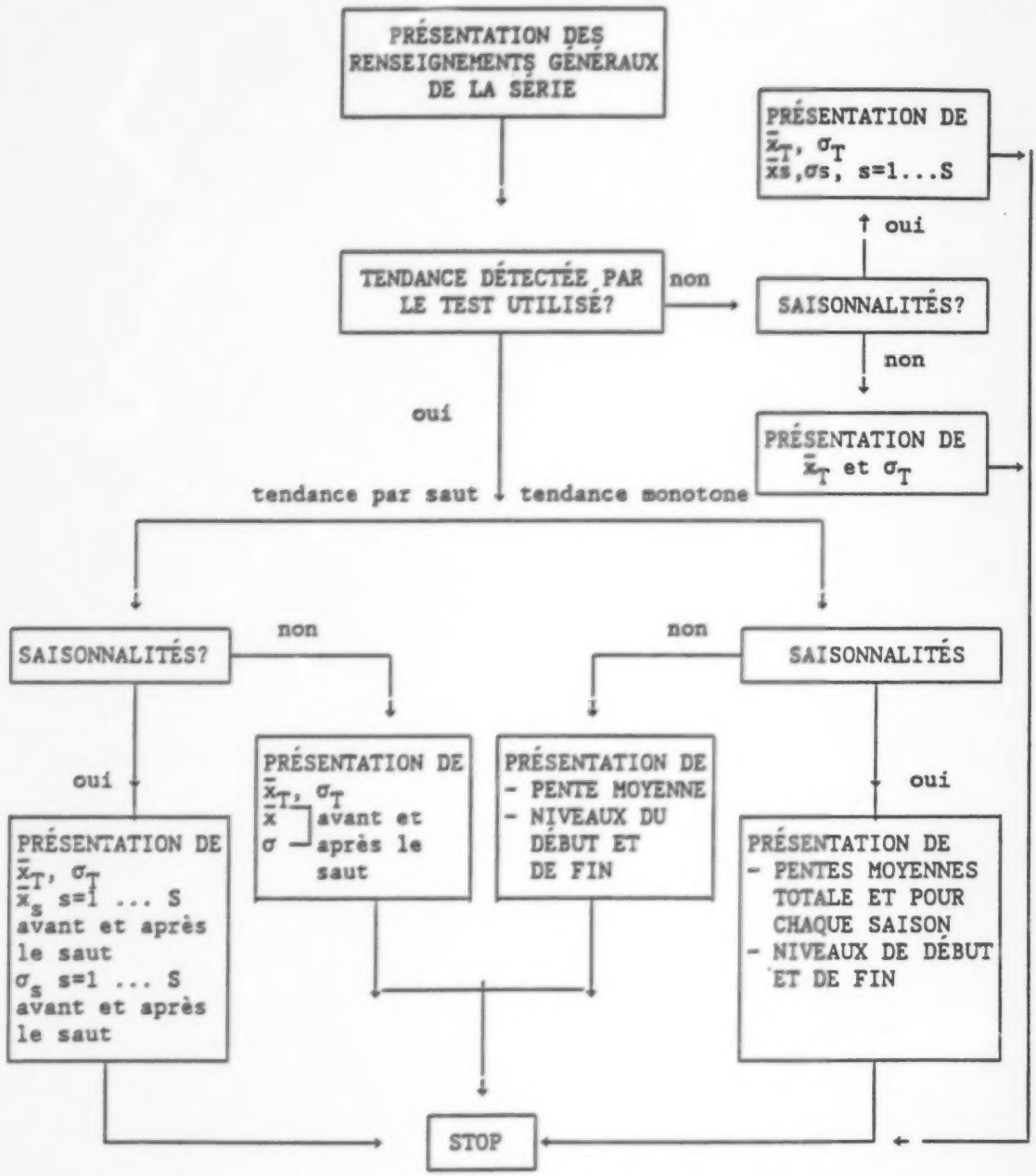
MONOTONE OU PAR SAUT?

Le choix de la détection d'une tendance monotone ou par saut peut être fait selon la connaissance de l'usager du phénomène sous-jacent à la série de mesure. L'objectif de l'analyse aide aussi à un tel choix; par exemple si on veut tester l'impact de l'implantation d'une usine, il serait intéressant de choisir la détection d'une tendance par saut avec la séparation à la date de

9.1 Organigramme du programme P5.EXE



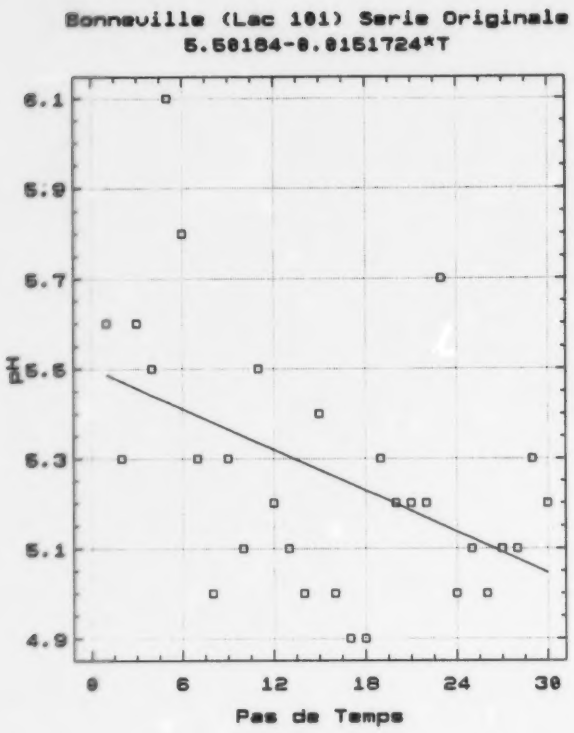
11.1 Organigramme du programme P6.EXE

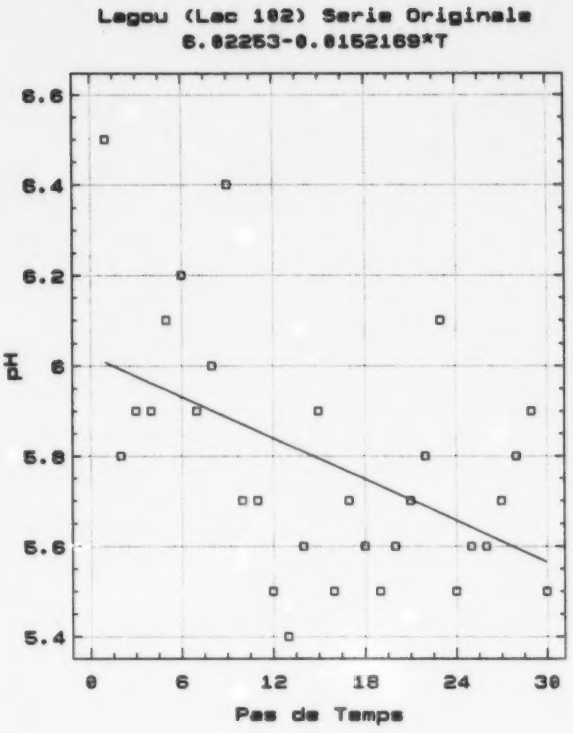


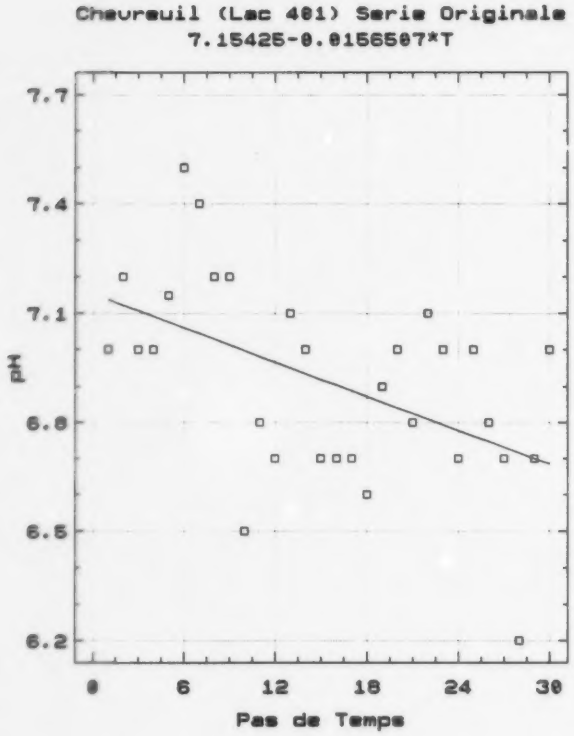
$\bar{x}_T$ = moyenne de la série totale
σ_T = écart-type de la série totale
$\bar{x}$ = moyenne
σ = écart-type
S = nombre de saisons

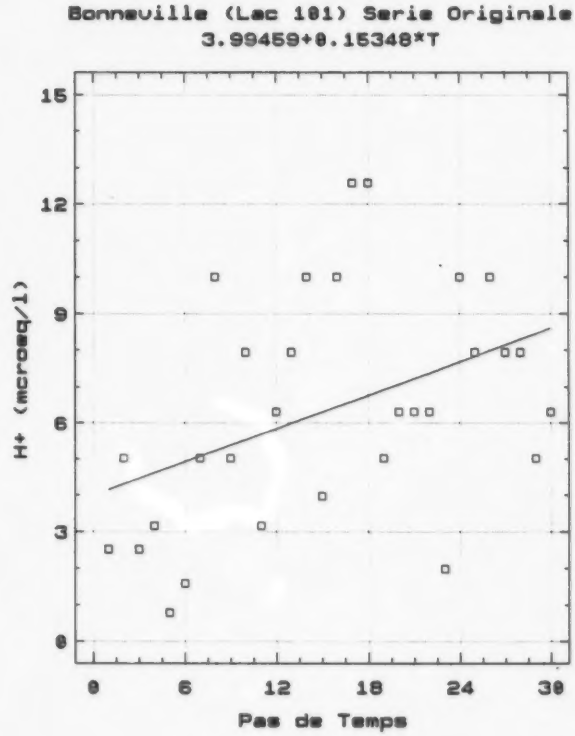
Annexe 2

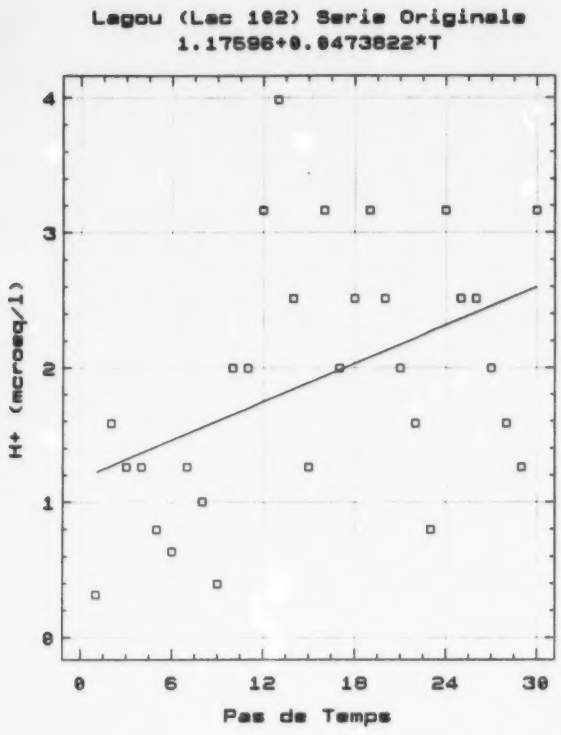
Graphiques-Séries avec Tendances Monotones

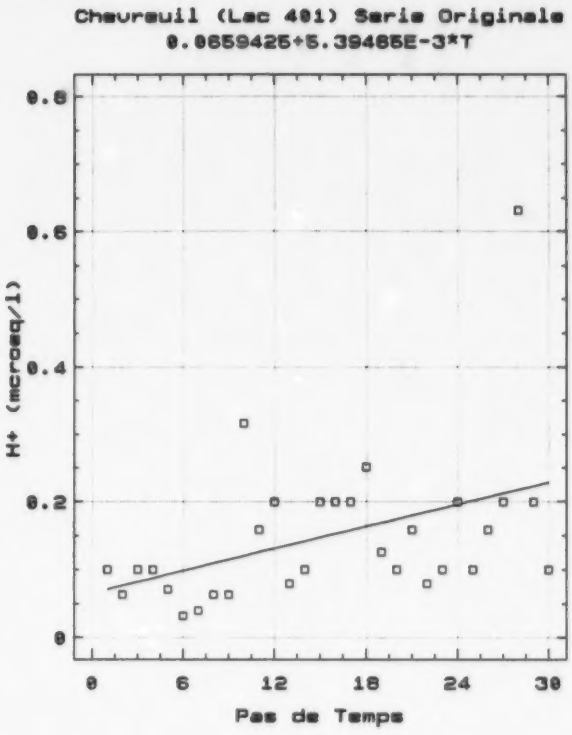

Bonneville (Lac 101) Serie Originale
5.58184-0.0151724*T
pH
6.1
5.9
5.7
5.5
5.3
5.1
4.9
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

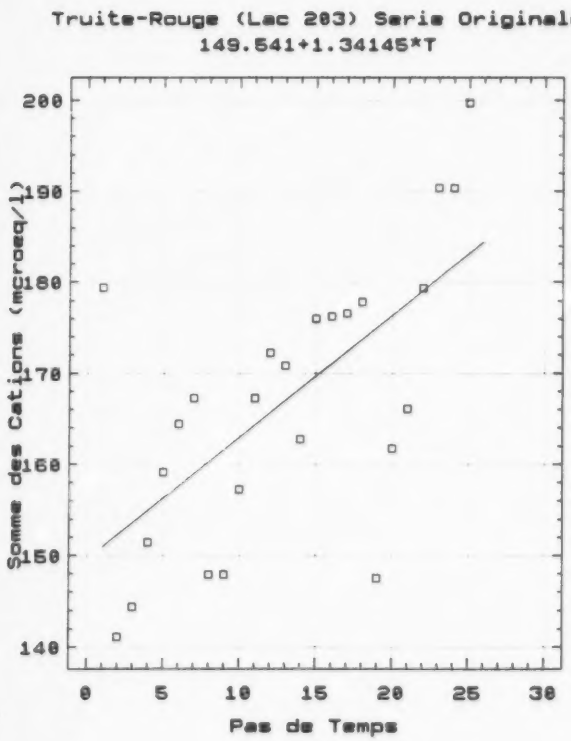

Lagou (Lac 102) Serie Originale
6.02253-0.0152169*T
pH
6.6
6.4
6.2
6
5.8
5.6
5.4
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

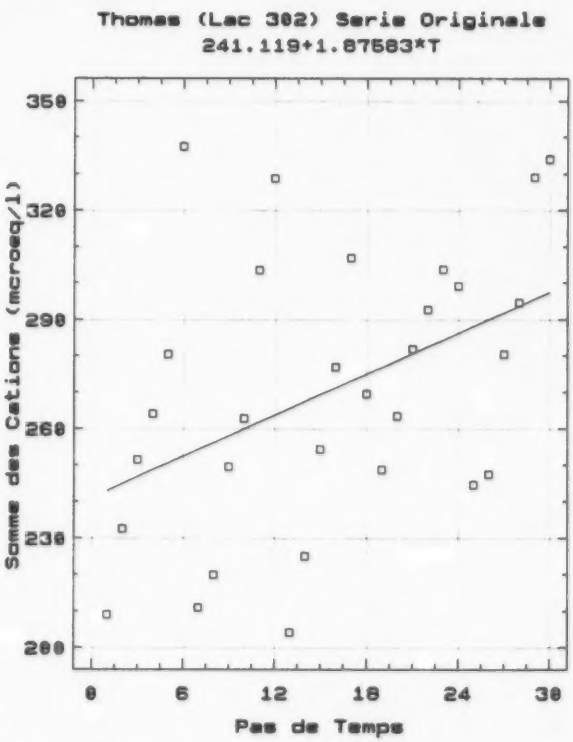

Chevreuil (Lac 401) Serie Originale
7.15425-0.0156507*T
pH
7.7
7.4
7.1
6.8
6.5
6.2
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

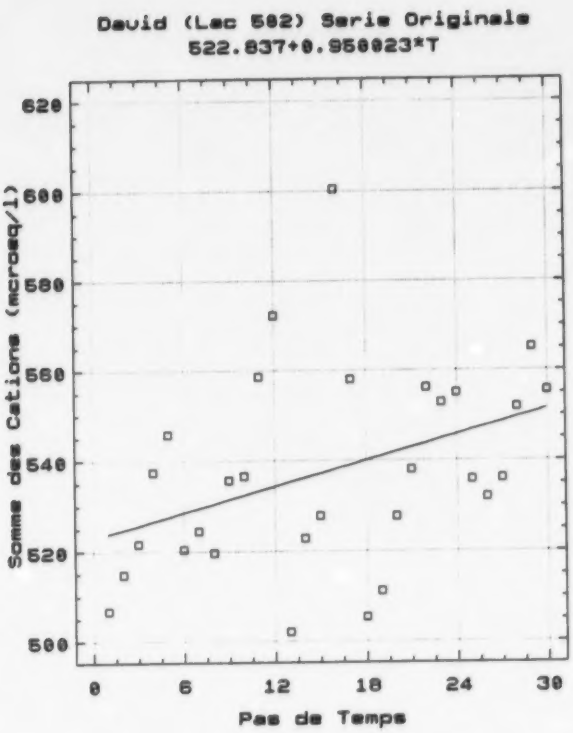

Bonneville (Lac 101) Serie Originale
3.99459+0.15348*T
H+ (microeq/l)
15
12
9
6
3
0
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

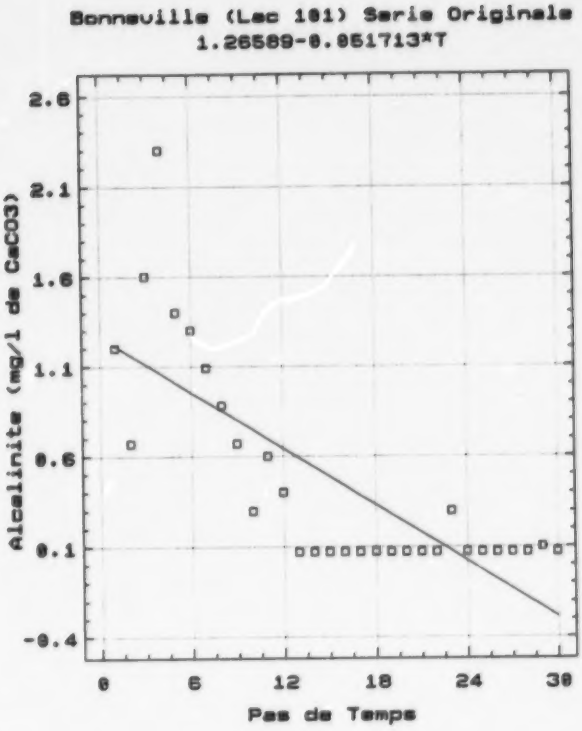

Lagou (Lac 102) Serie Originale
1.17596+0.0473822*T
H+ (mcroeq/l)
Pas de Temps
0
1
2
3
4
0
6
12
18
24
30

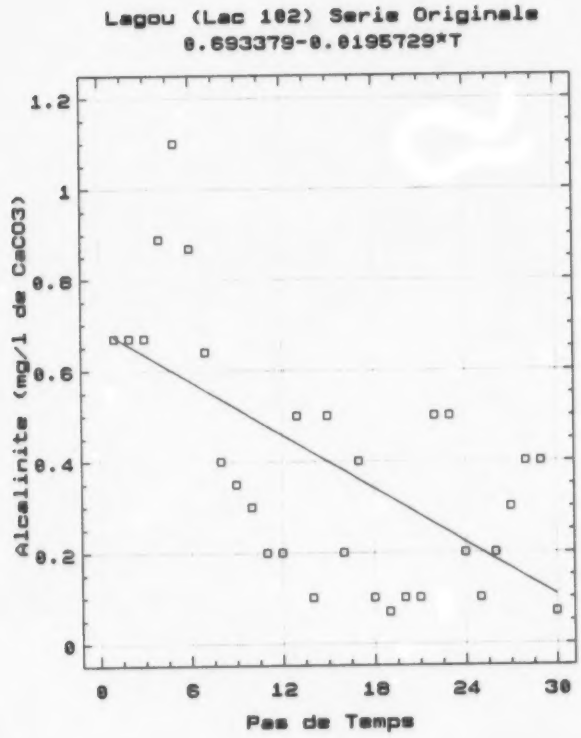

Chevreuil (Lac 401) Serie Originale
0.0659425+5.39485E-3*T
H+ (mcroeq/l)
Pas de Temps
0
0.2
0.4
0.6
0.8
0
6
12
18
24
30

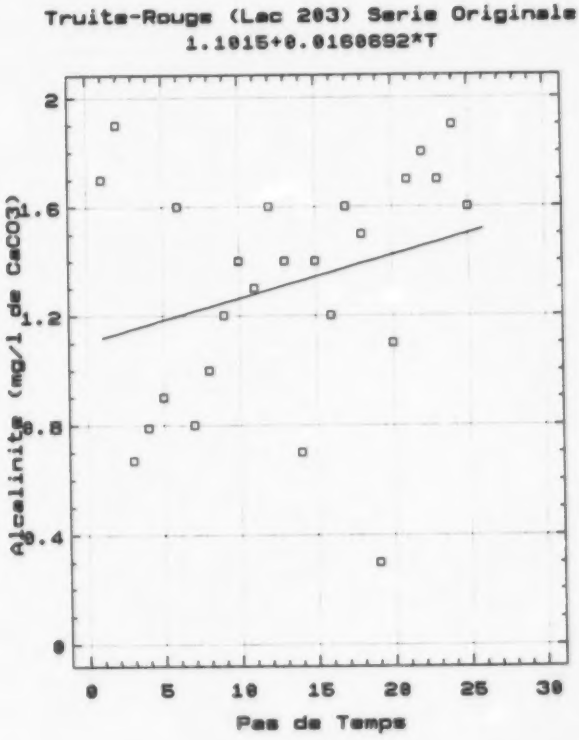

Truite-Rouge (Lac 203) Serie Originale
149.541+1.34145*T
Somme des Cations (mcroeq/l)
Pas de Temps
140
150
160
170
180
190
200
0
5
10
15
20
25
30

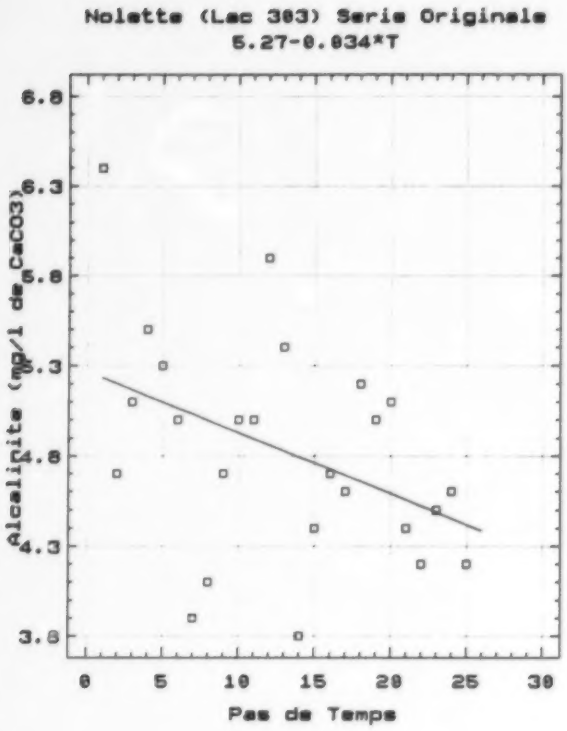

Thomas (Lac 302) Serie Originale
241.119+1.87583*T
Somme des Cations (mcroeq/l)
Pas de Temps
200
230
260
290
320
350
0
6
12
18
24
30

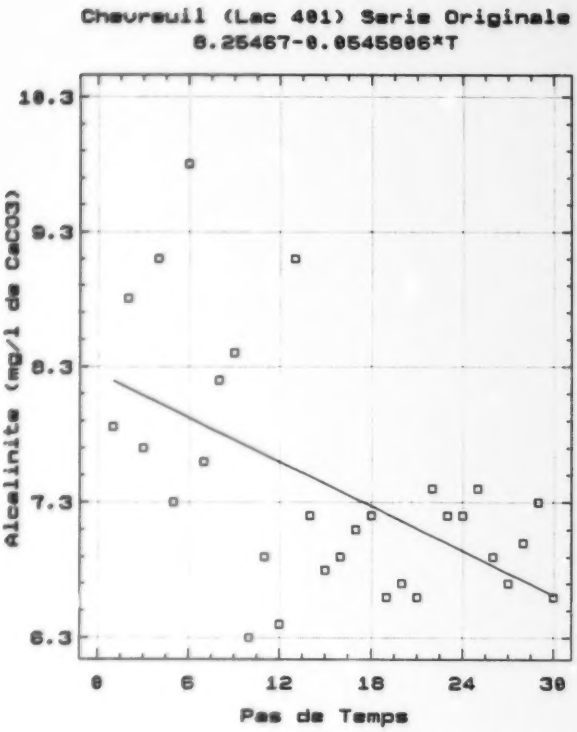

David (Lac 502) Serie Originale
522.837+0.950923*T
Somme des Cations (mcroeq/l)
620
600
580
560
540
520
500
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

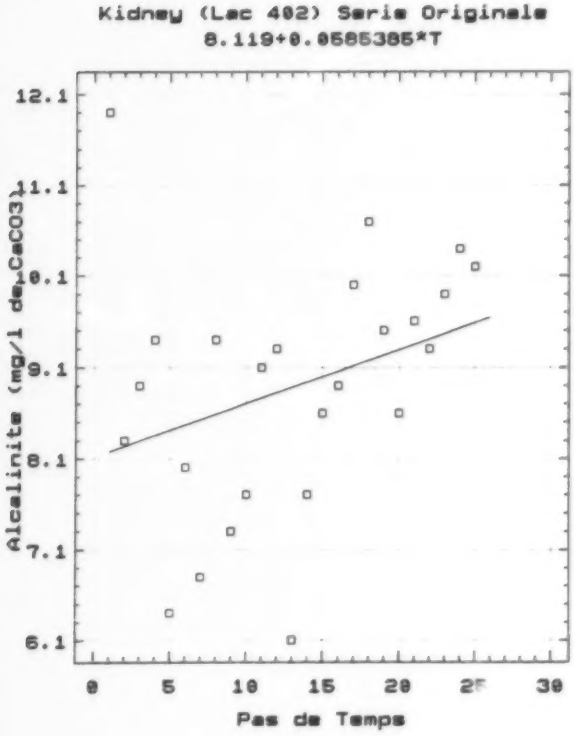

Bonneville (Lac 101) Serie Originale
1.26589-0.051713*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
2.6
2.1
1.6
1.1
0.6
0.1
-0.4
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

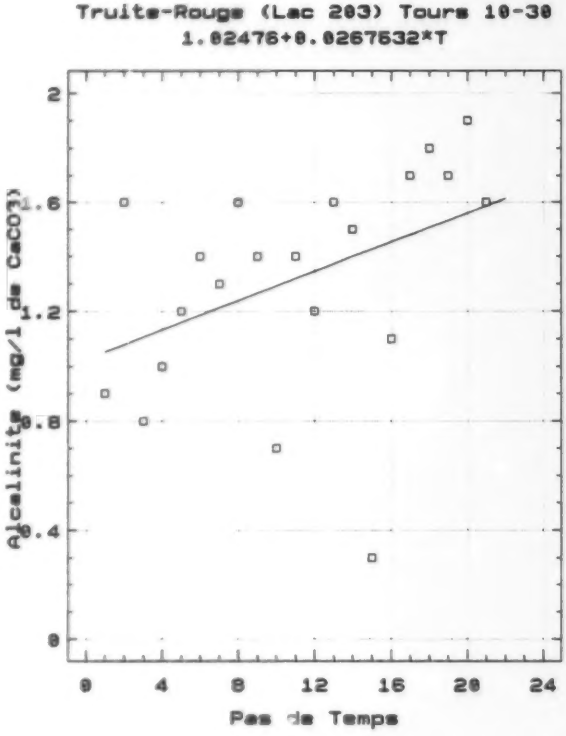

Lagou (Lac 102) Serie Originale
0.693379-0.0195729*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

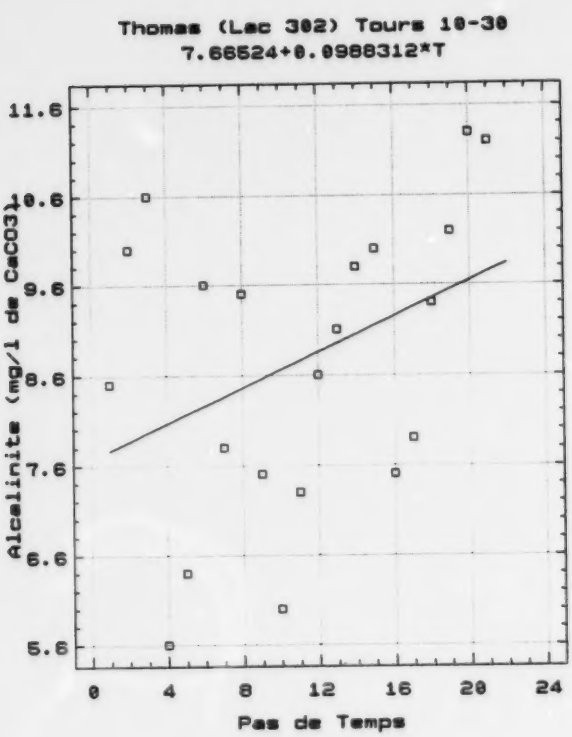

Truite-Rouge (Lac 203) Serie Originale
1.1015+0.0160692*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
2
1.6
1.2
0.8
0.4
0
0
5
10
15
20
25
30
Pas de Temps

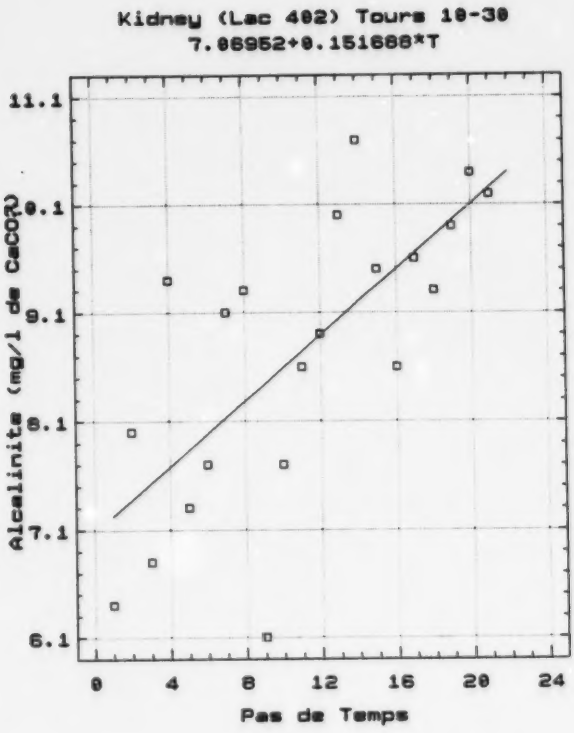

Nolette (Lac 303) Serie Originale
5.27-0.034*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
Pas de Temps
6.8
6.3
5.8
5.3
4.8
4.3
3.8
0
5
10
15
20
25
30

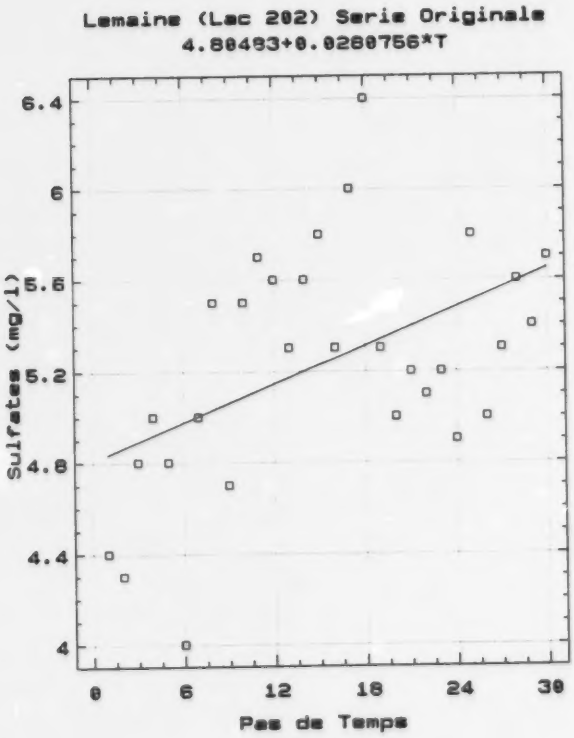

Chevreuil (Lac 401) Serie Originale
8.25467-0.0545806*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
Pas de Temps
10.3
9.3
8.3
7.3
6.3
0
6
12
18
24
30

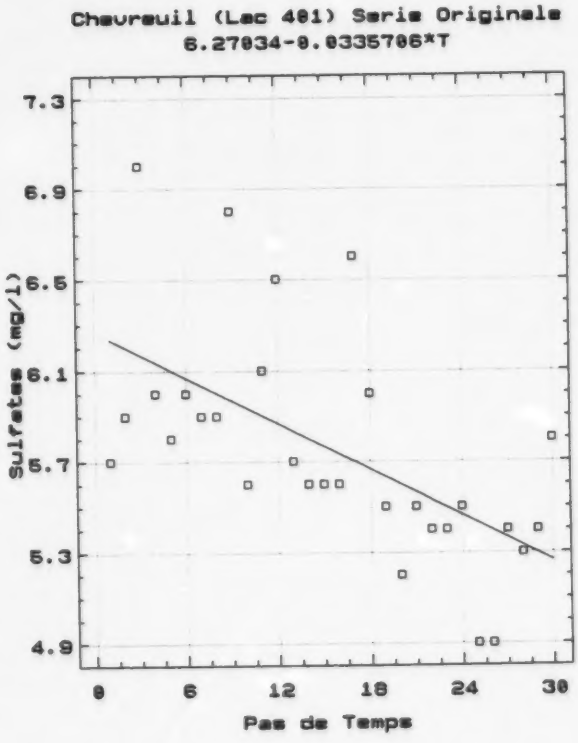

Kidney (Lac 402) Serie Originale
8.119+0.0585385*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
Pas de Temps
12.1
11.1
10.1
9.1
8.1
7.1
6.1
0
5
10
15
20
25
30

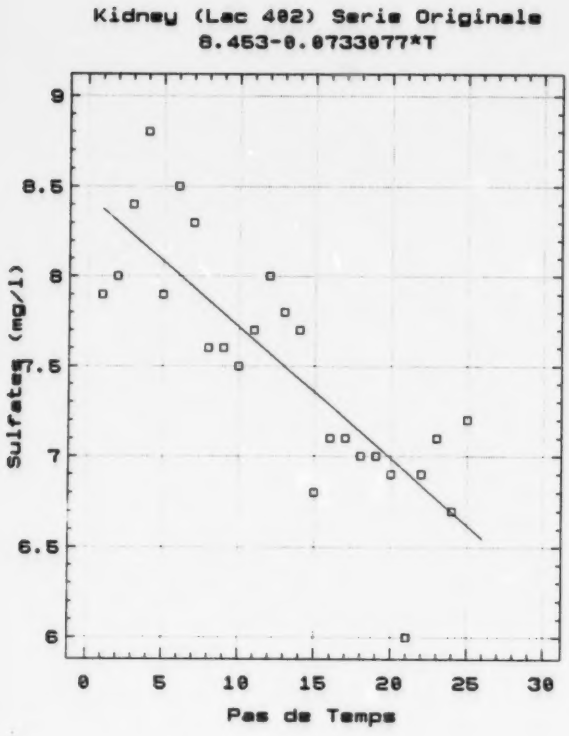

Truite-Rouge (Lac 203) Tours 10-30
1.02476+0.0267532*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
Pas de Temps
2
1.6
1.2
0.8
0.4
0
0
4
8
12
16
20
24

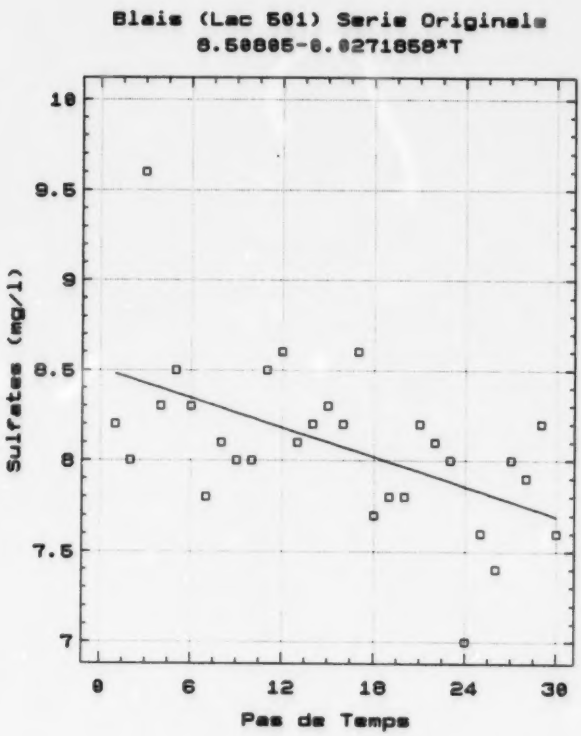

Thomas (Lac 302) Tours 10-30
7.66524+0.0988312*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
11.6
10.6
9.6
8.6
7.6
6.6
5.6
0
4
8
12
16
20
24
Pas de Temps

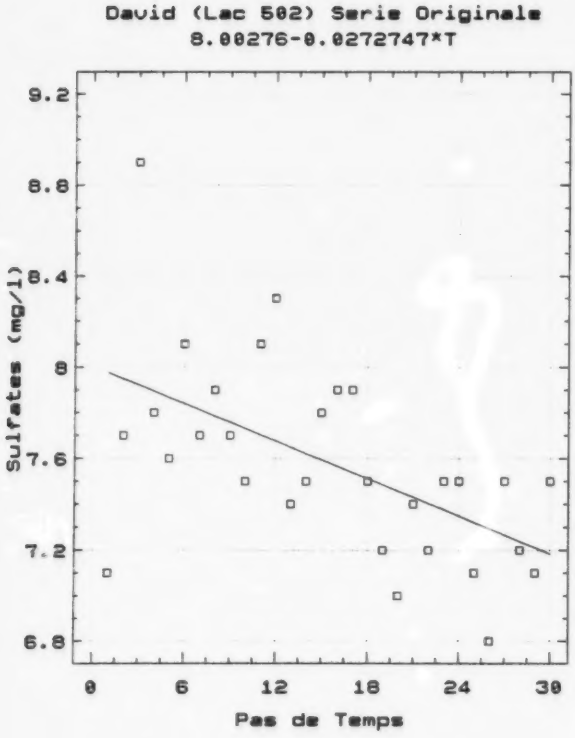

Kidney (Lac 402) Tours 10-30
7.66952+0.151668*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
11.1
10.1
9.1
8.1
7.1
6.1
0
4
8
12
16
20
24
Pas de Temps

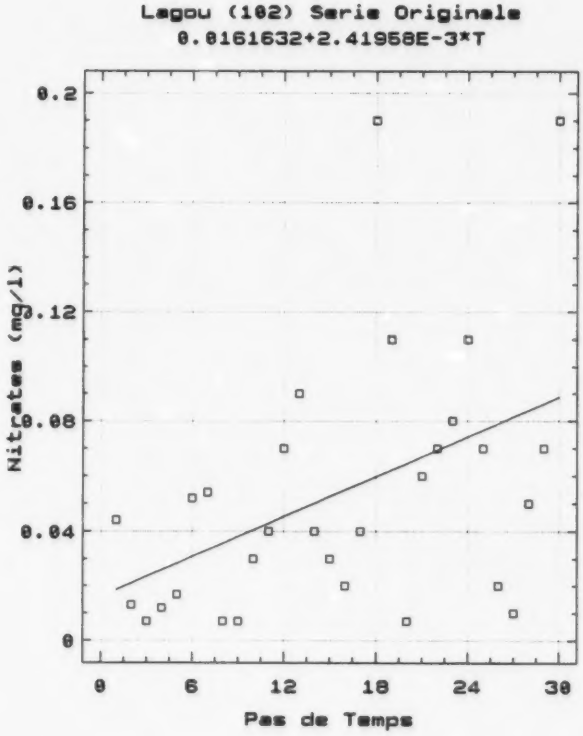

Lemaine (Lac 202) Serie Originale
4.80483+0.0280756*T
Sulfates (mg/l)
6.4
6
5.6
5.2
4.8
4.4
4
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

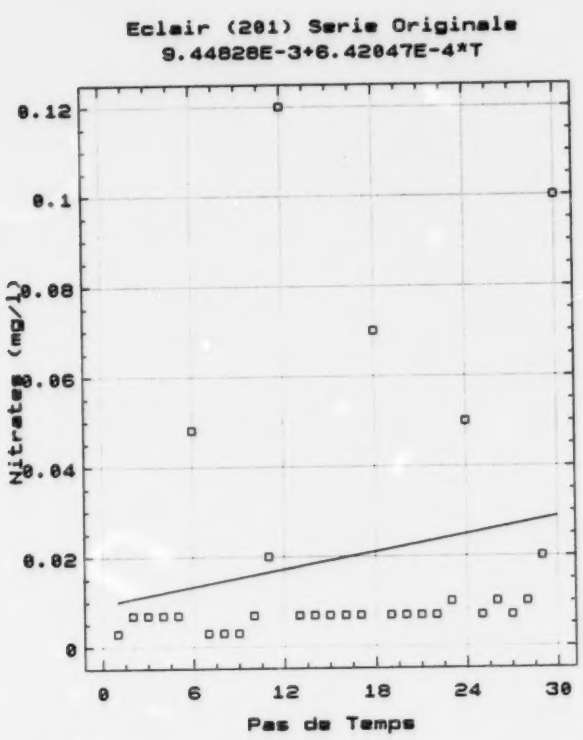

Chevreuil (Lac 401) Serie Originale
6.27034-0.0335706*T
Sulfates (mg/l)
7.3
6.9
6.5
6.1
5.7
5.3
4.9
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

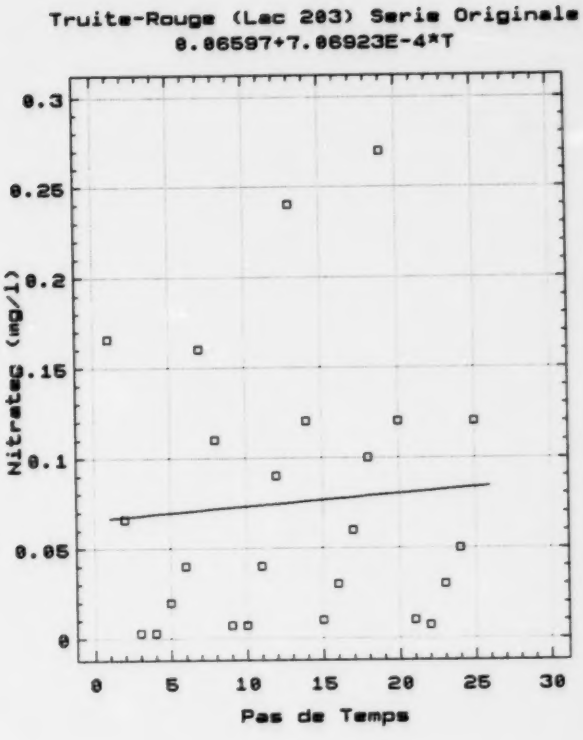

Kidney (Lac 402) Serie Originale
8.453-0.0733077*T
Sulfates (mg/l)
Pas de Temps

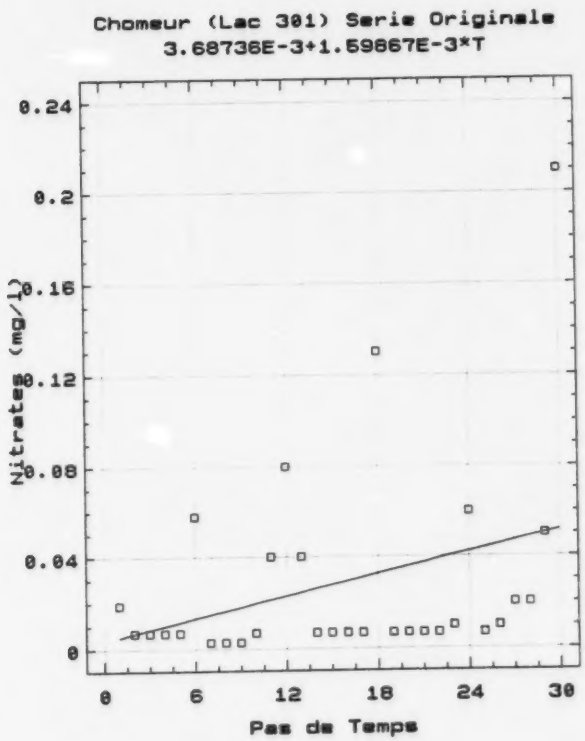

Blais (Lac 501) Serie Originale
8.50885-0.0271858*T
Sulfates (mg/l)
Pas de Temps

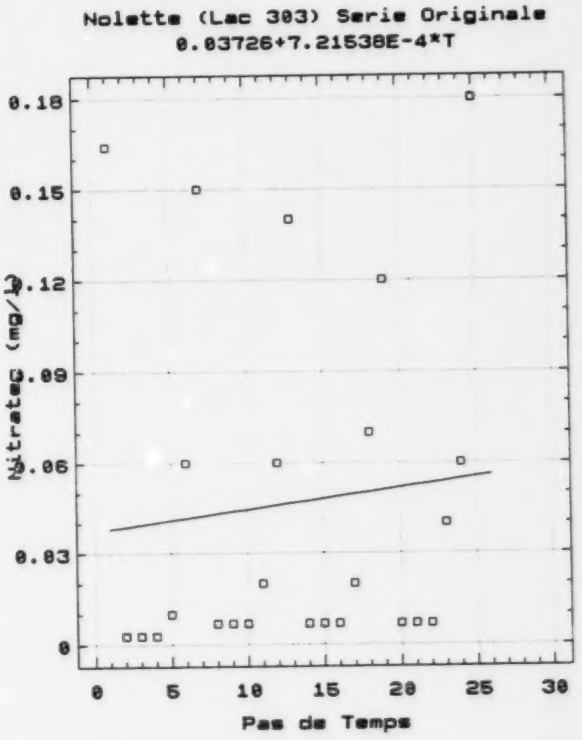

David (Lac 502) Serie Originale
8.00276-0.0272747*T
Sulfates (mg/l)
Pas de Temps

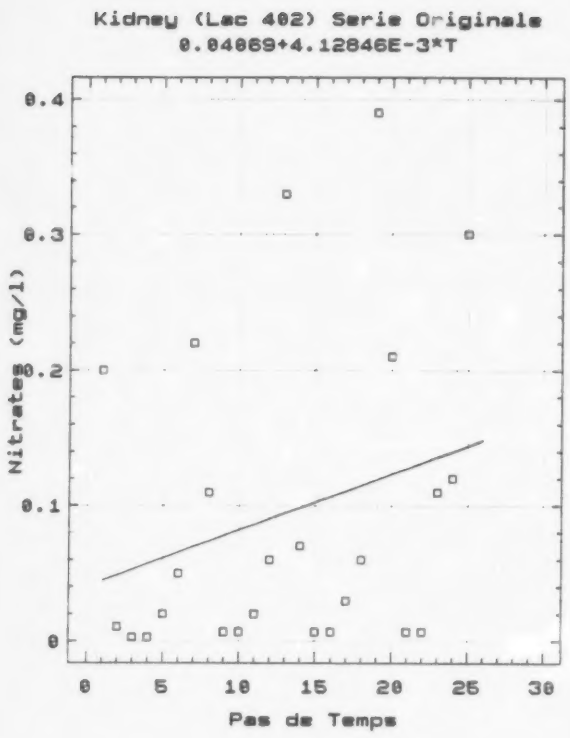

Lagou (102) Serie Originale
0.0161632+2.41958E-3*T
Nitrates (mg/l)
Pas de Temps

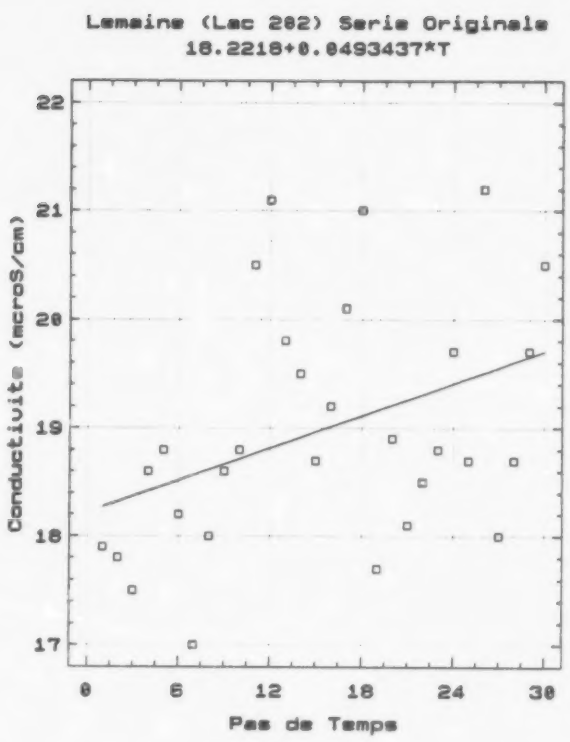

Eclair (201) Serie Originale
9.44828E-3+6.42047E-4*T
Nitrates (mg/l)
0.12
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

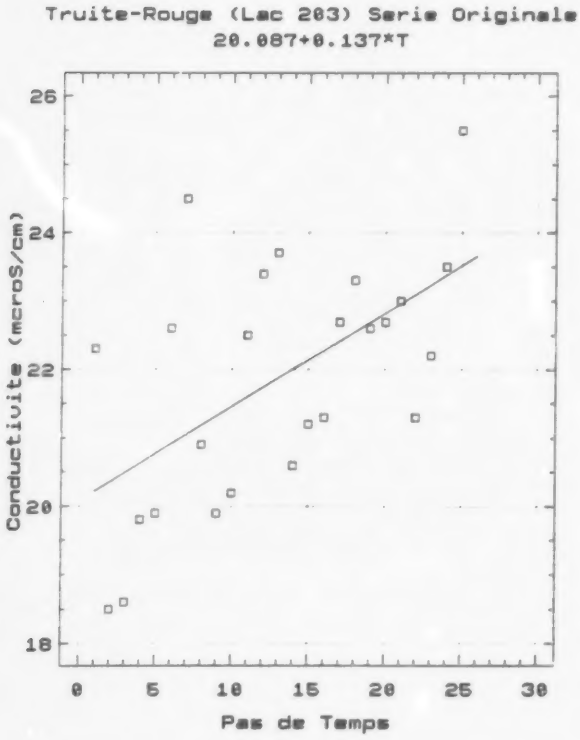

Truite-Rouge (Lac 203) Serie Originale
0.06597+7.06923E-4*T
Nitrates (mg/l)
0.3
0.25
0.2
0.15
0.1
0.05
0
0
5
10
15
20
25
30
Pas de Temps

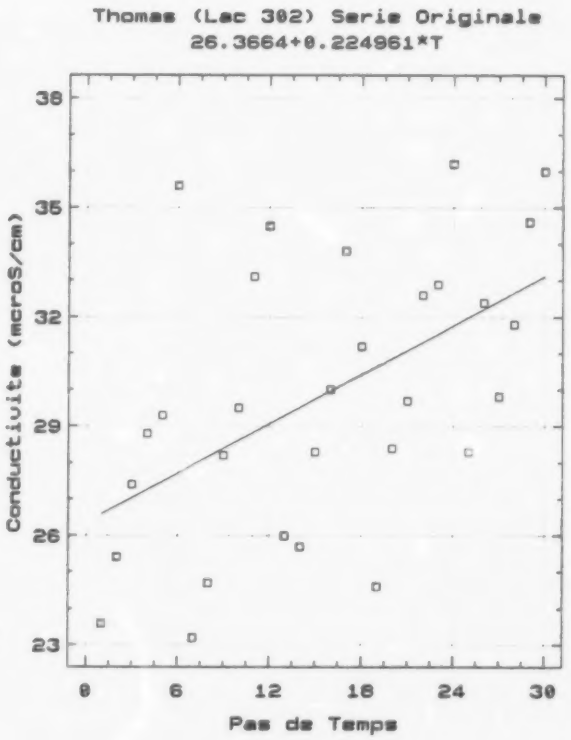

Chomeur (Lac 301) Serie Originale
3.68736E-3+1.59867E-3*T
Nitrates (mg/l)
0.24
0.2
0.16
0.12
0.08
0.04
0
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

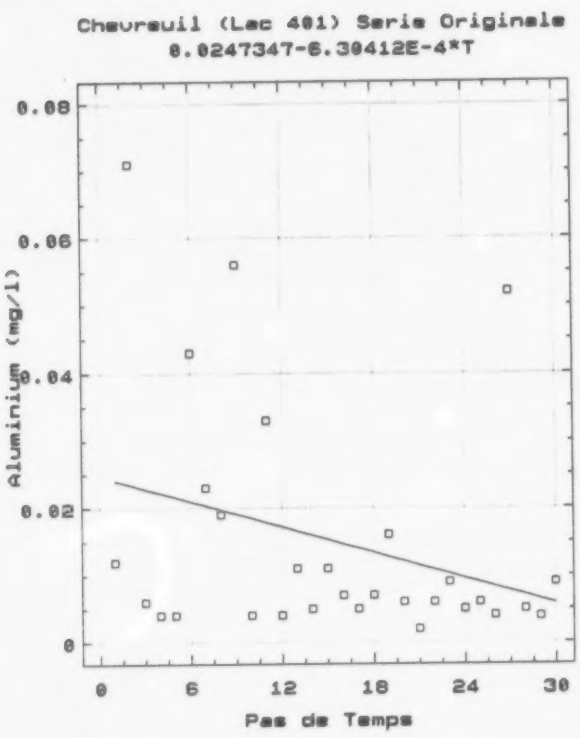

Nolette (Lac 303) Serie Originale
0.03726+7.21538E-4*T
Nitrates (mg/l)
0.18
0.15
0.12
0.09
0.06
0.03
0
0
5
10
15
20
25
30
Pas de Temps

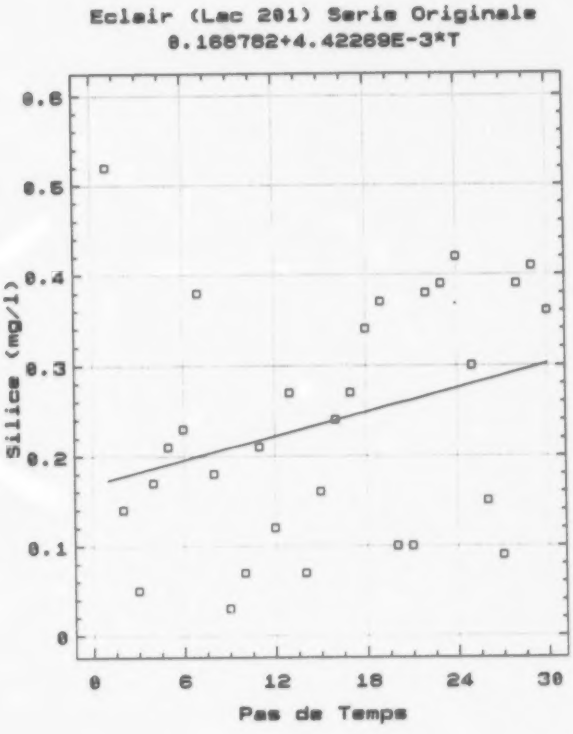

Kidney (Lac 402) Serie Originale
0.04069+4.12846E-3*T
Nitrates (mg/l)
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
5
10
15
20
25
30
Pas de Temps

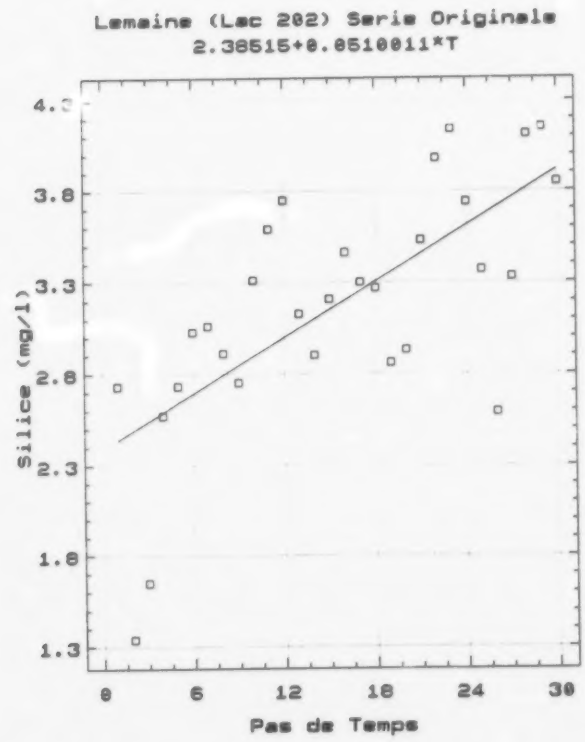

Lemaine (Lac 202) Serie Originale
18.2218+0.0493437*T
Conductivite (microS/cm)
22
21
20
19
18
17
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

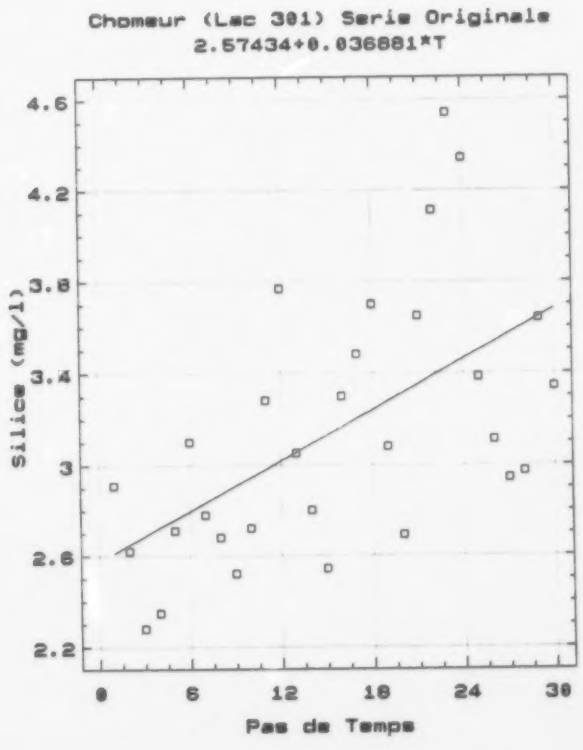

Truite-Rouge (Lac 203) Serie Originale
20.087+0.137*T
Conductivite (microS/cm)
26
24
22
20
18
0
5
10
15
20
25
30
Pas de Temps

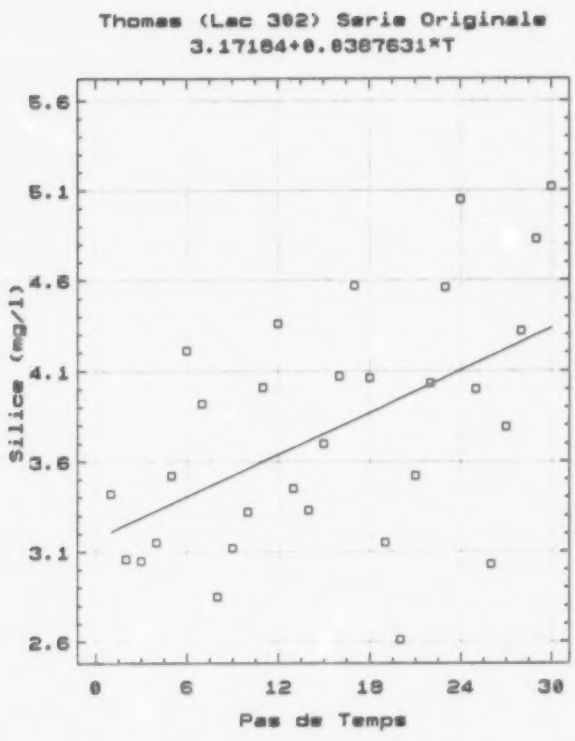

Thomas (Lac 302) Serie Originale
26.3664+0.224961*T
Conductivite (microS/cm)
38
35
32
29
26
23
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

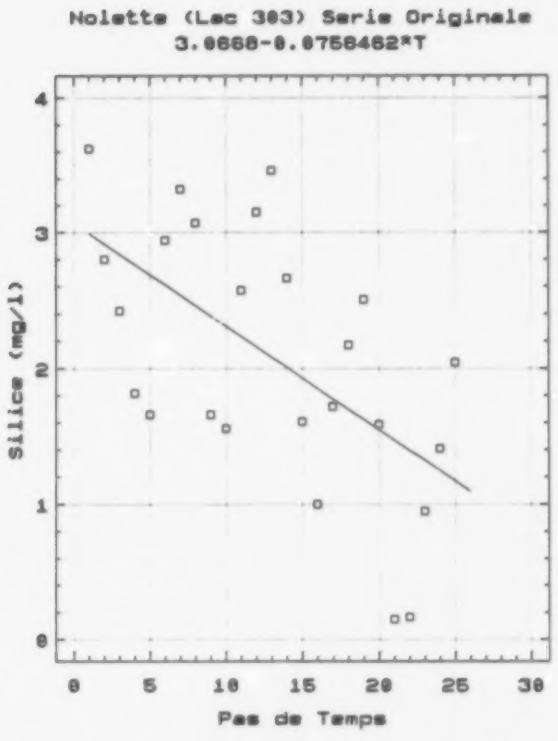

Chevreuil (Lac 401) Serie Originale
0.0247347-6.39412E-4*T
Aluminium (mg/l)
0.08
0.06
0.04
0.02
0
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

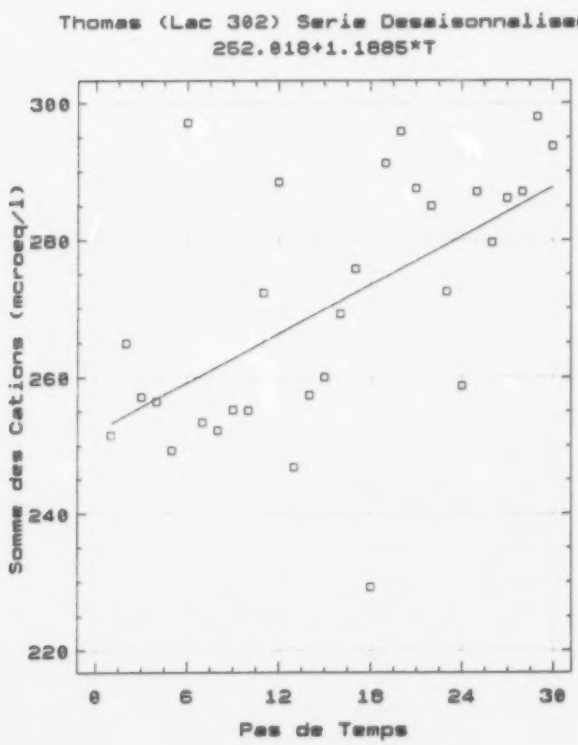

Eclair (Lac 201) Serie Originale
0.168782+4.42269E-3*T
Silice (mg/l)
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

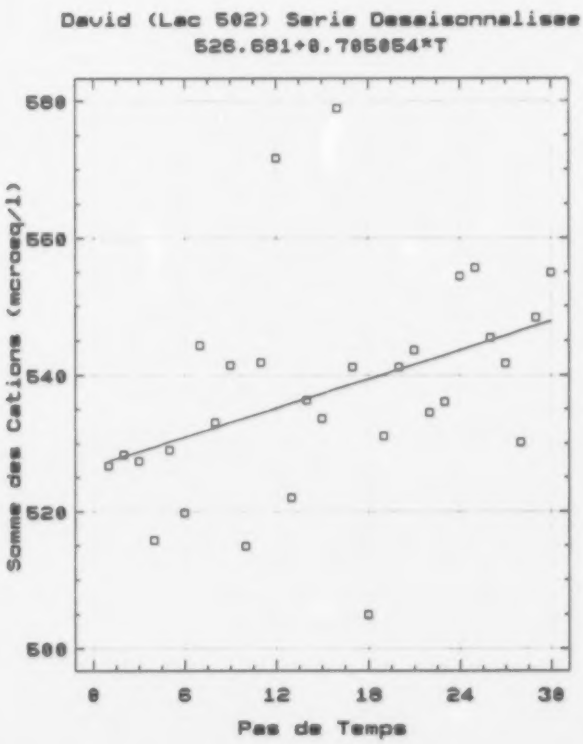

Lemaine (Lac 202) Serie Originale
2.38515+0.0510011*T
Silice (mg/l)
4.3
3.8
3.3
2.8
2.3
1.8
1.3
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

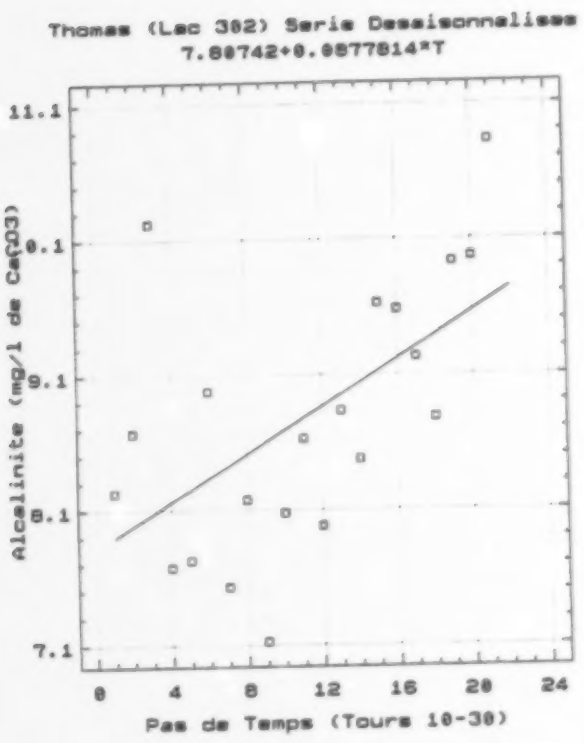

Chomeur (Lac 301) Serie Originale
2.57434+0.036881*T
Silice (mg/l)
4.6
4.2
3.8
3.4
3
2.6
2.2
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

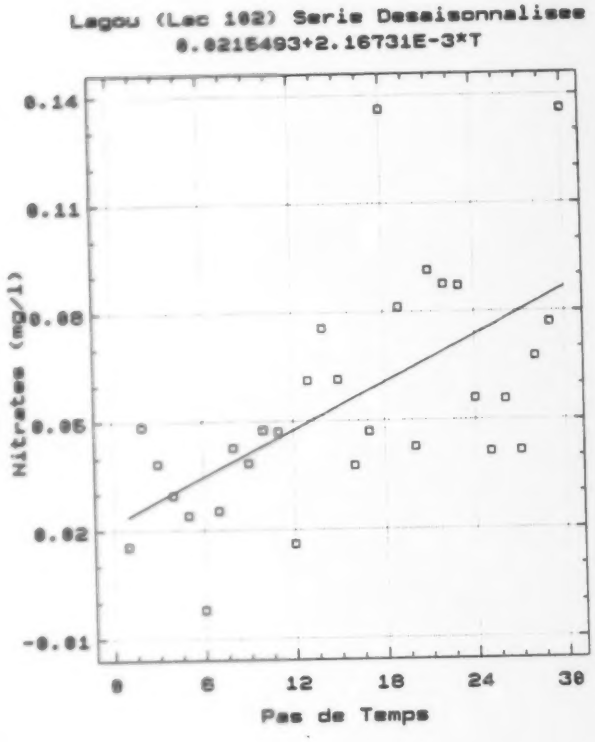

Thomas (Lac 302) Serie Originale
3.17184+0.0387631*T
Silice (mg/l)
Pas de Temps
5.6
5.1
4.6
4.1
3.6
3.1
2.6
0
6
12
18
24
30

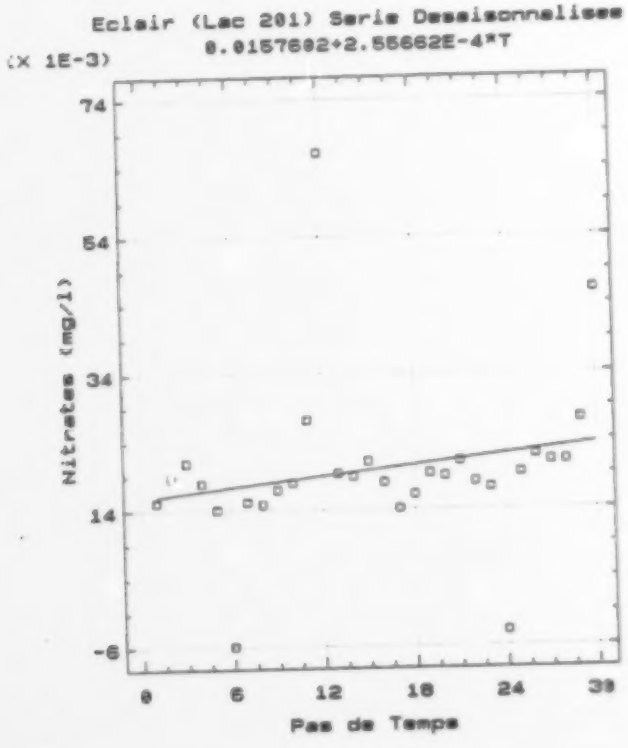

Nolette (Lac 303) Serie Originale
3.0668-0.0758462*T
Silice (mg/l)
Pas de Temps
4
3
2
1
0
0
5
10
15
20
25
30

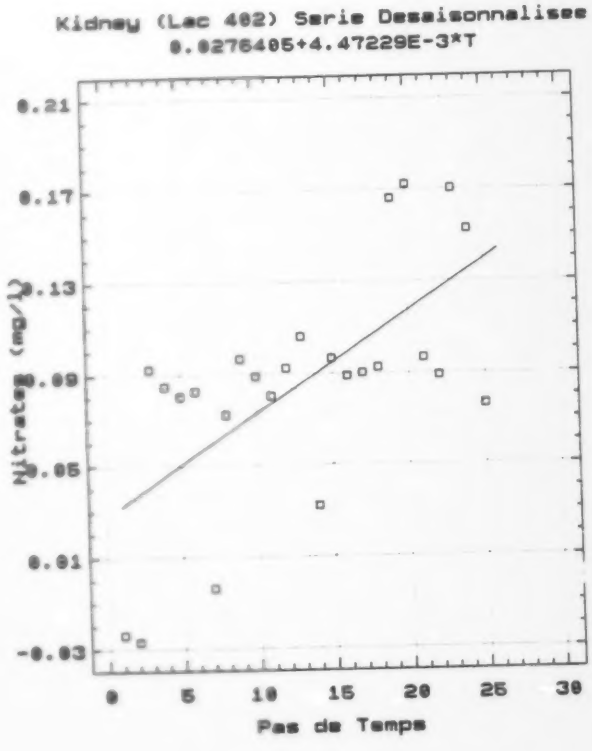

Thomas (Lac 302) Serie Desaisonnalisee
252.018+1.1885*T
Somme des Cations (mcroeq/l)
Pas de Temps
300
280
260
240
220
0
6
12
18
24
30

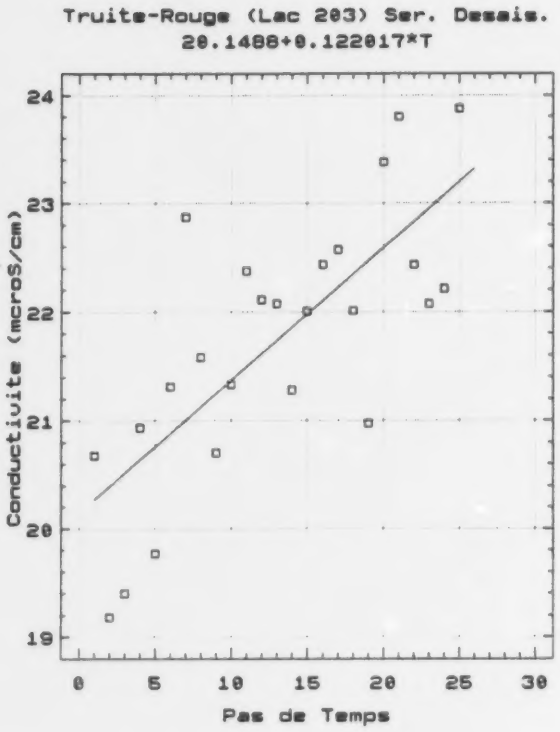

David (Lac 502) Serie Desaisonnalisee
526.681+0.765054*T
Somme des Cations (mcroeq/l)
Pas de Temps
580
560
540
520
500
0
6
12
18
24
30

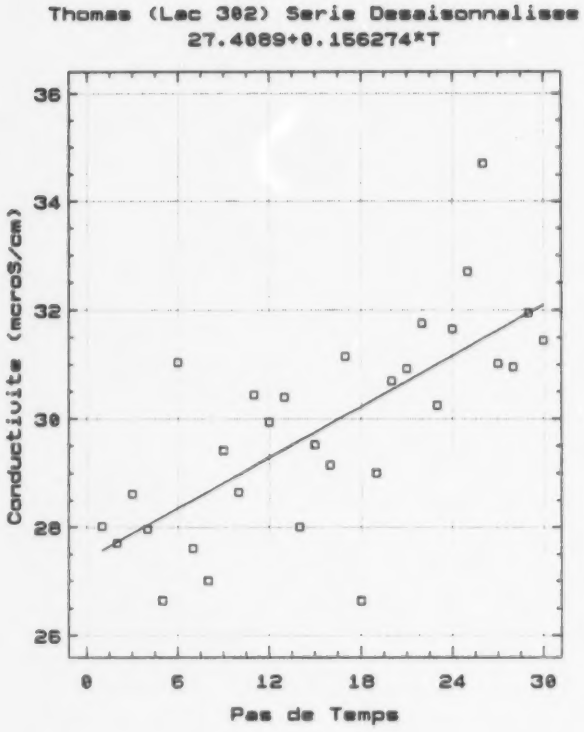

Thomas (Lac 302) Serie Desaisonnalisee
7.88742+0.0877814*T
11.1
10.1
9.1
8.1
7.1
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
0
4
8
12
16
20
24
Pas de Temps (Tours 10-30)

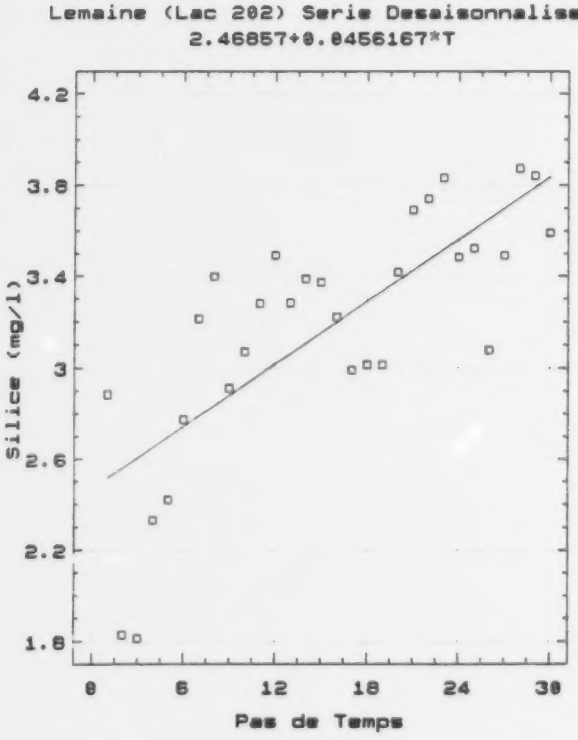

Lagou (Lac 102) Serie Desaisonnalisee
0.0215493+2.16731E-3*T
0.14
0.11
0.08
0.05
0.02
-0.01
Nitrates (mg/l)
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

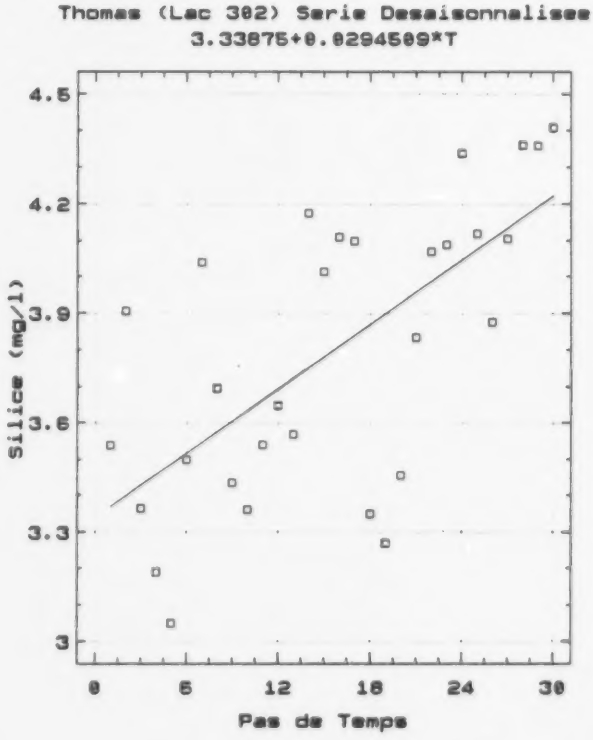

Eclair (Lac 201) Serie Desaisonnalisee
0.0157692+2.55662E-4*T
(X 1E-3)
74
54
34
14
-6
Nitrates (mg/l)
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

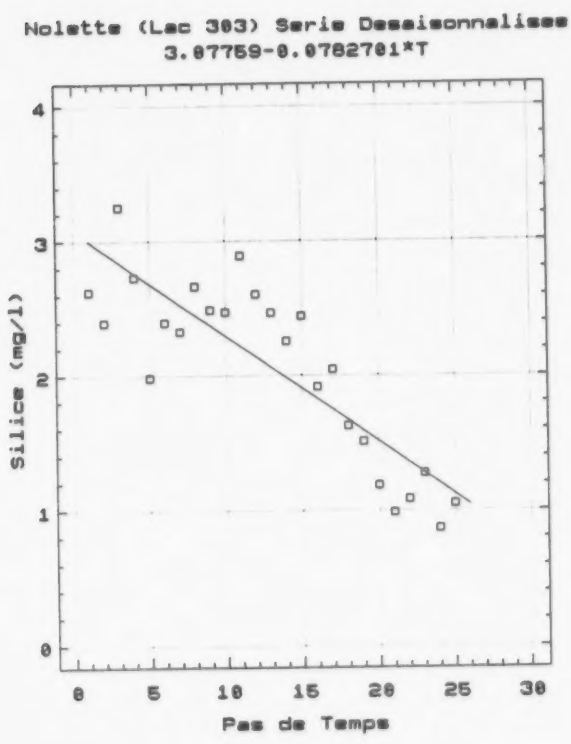

Kidney (Lac 402) Serie Desaisonnalisee
0.0276405+4.47229E-3*T
0.21
0.17
0.13
0.09
0.05
0.01
-0.03
Nitrates (mg/l)
0
5
10
15
20
25
30
Pas de Temps

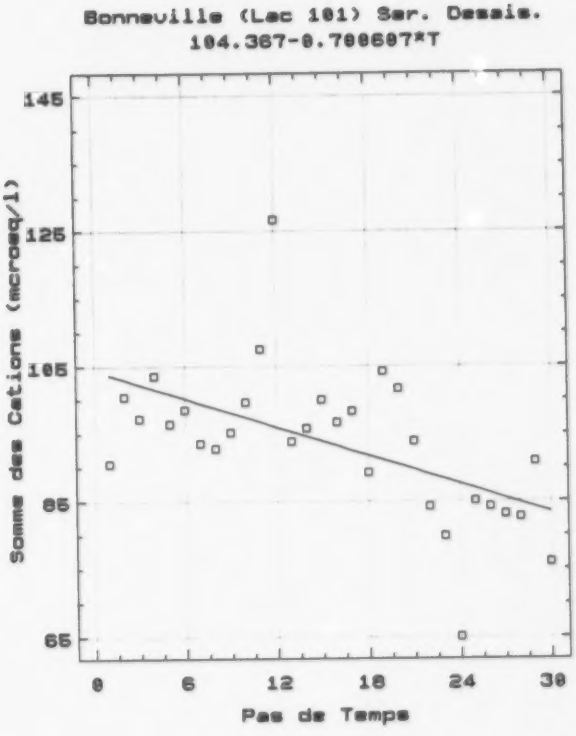

Truite-Rouge (Lac 203) Ser. Desais.
20.1488+0.122017*T
Conductivite (mcroS/cm)
Pas de Temps

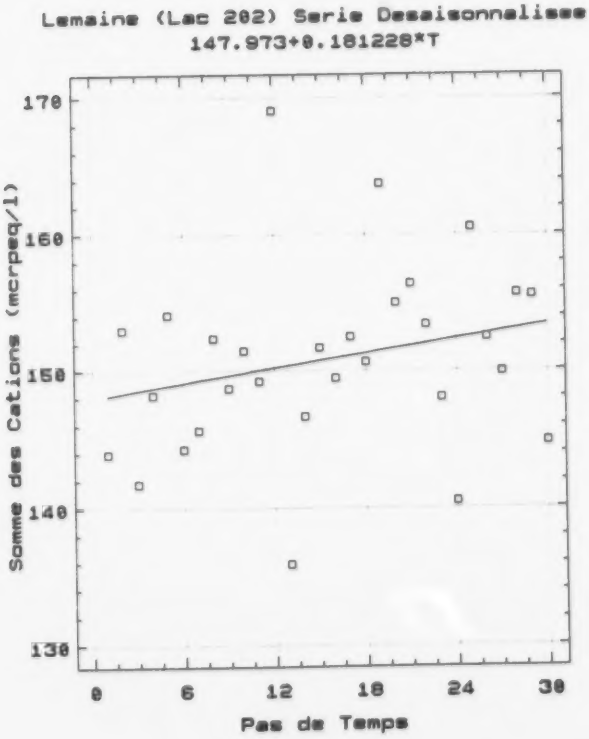

Thomas (Lac 302) Serie Desaisonnalisee
27.4089+0.156274*T
Conductivite (mcroS/cm)
Pas de Temps

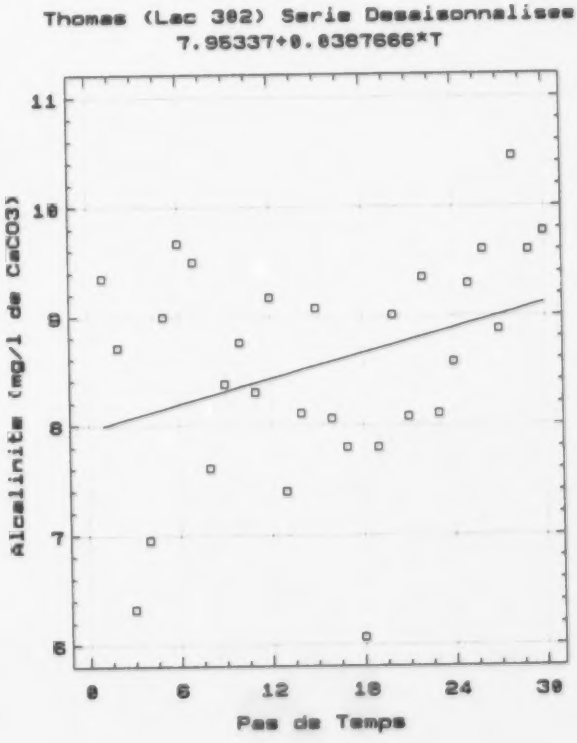

Lemaine (Lac 202) Serie Desaisonnalisee
2.46857+0.0456167*T
Silice (mg/l)
Pas de Temps

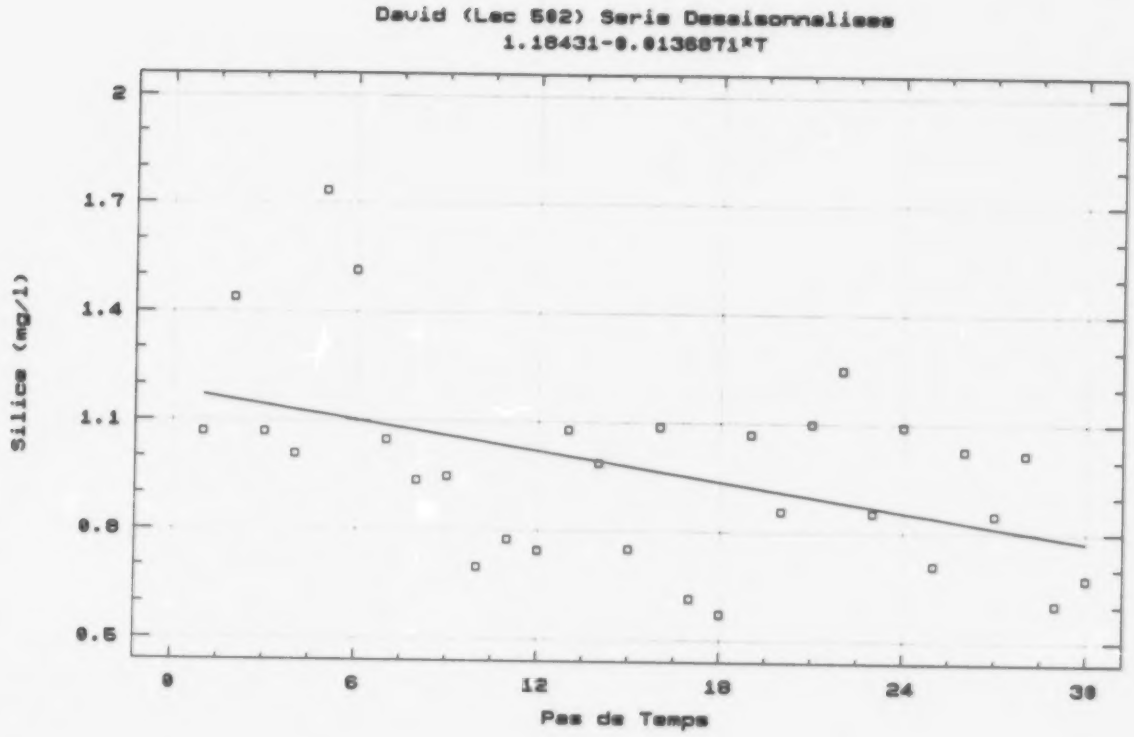

Thomas (Lac 302) Serie Desaisonnalisee
3.33875+0.0294509*T
Silice (mg/l)
Pas de Temps


Nolette (Lac 303) Serie Desaisonnalisee
3.07759-0.0782701*T
Silice (mg/l)
Pas de Temps
0
1
2
3
4
0
5
10
15
20
25
30


Bonneville (Lac 101) Ser. Desais.
104.367-0.700697*T
Somme des Cations (mcroeq/l)
Pas de Temps
65
85
105
125
145
0
6
12
18
24
30


Lemaire (Lac 202) Serie Desaisonnalisee
147.973+0.181228*T
Somme des Cations (mcrpeq/l)
Pas de Temps
130
140
150
160
170
0
6
12
18
24
30


Thomas (Lac 302) Serie Desaisonnalisee
7.95337+0.0387666*T
Alcalinite (mg/l de CaCO3)
Pas de Temps
6
7
8
9
10
11
0
6
12
18
24
30


David (Lac 502) Serie Desaisonnalisee
1.18431-0.0136871*T
Silice (mg/l)
2
1.7
1.4
1.1
0.8
0.5
0
6
12
18
24
30
Pas de Temps

Annexe 3

Fiches des tests non paramétriques utilisés par DETECT

Source : Cluis et al, 1988

14.4 Structure des fiches de test

OBJET DU TEST: 1-Hypothèse nulle. 2-Hypothèse alternative.

CONDITIONS D'APPLICATION: Conditions dans lesquelles le test doit être effectué. Exemple: indépendance, normalité, etc.

APPLICATION POUR LES TENDANCES: Explication des changements à effectuer pour utiliser ce test dans le but de détecter des tendances.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: Renseignements concernant l'application en hydrologie et renvoie à un test plus approprié lorsque les caractéristiques particulières entrent en conflit avec les conditions d'application.

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: Présentation de la statistique utilisée pour le test et de la façon dont on l'obtient.

VALEURS CRITIQUES: 1-Présentation des valeurs critiques pour petits et grands échantillons. 2-Tableau sommaire des valeurs critiques pour un seuil de 95%.

CORRECTIONS: 1-Correction de continuité. 2-Corrections en présence de valeurs (rangs) égales.

PUISSANCE: Présentation des résultats connus quant à la puissance et à la robustesse du test.

RÉFÉRENCES: 1-Référence statistique. 2-Référence sur l'application dans le domaine de la qualité de l'eau.

14.5 Fiches des tests

Les fichiers suivants donnant un résumé des hypothèses, modes de calcul et valeurs critiques de tests utilisés.

TEST DE MANN WHITNEY — FICHE # 1

OBJET DU TEST: 1- Égalité des moyennes de deux échantillons ($\mu_1=\mu_2$). 2- Moyennes différentes, sous forme unilatérale ($\mu_1 \leq \mu_2$ ou $\mu_2 \leq \mu_1$) ou bilatérale ($\mu_1 \neq \mu_2$).

CONDITIONS D'APPLICATION: La série de mesures ne doit pas contenir de persistance ou de saisonnalité.

APPLICATION POUR LES TENDANCES: On divise la série en deux parties 1, ..., n_1 et $(n_1 + 1)$, ..., N, avec $n_2 = N-n_1$, et n_2 n'a pas à égaler n_1. On peut alors tester pour détecter une tendance sur la moyenne. Ce test est plus approprié pour détecter une tendance par saut, mais il détectera également des tendances monotones.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: Dans la cas où une persistance est présente, on doit se référer au test de LETTENMAIER MANN-WHITNEY, fiche # 2. Si une composante de saisonnalité est présente, on peut alors utilisé le test de MANN-WHITNEY saisonnier fiche # 3

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: On donne les rangs pour l'échantillon complet $x_1 \ldots x_N$. Soit R_{i1} = le rang de la i^eobservation du groupe 1. On utilise alors la statistique: $U = \sum_{i=1}^{n_1} R_{i1}$

VALEURS CRITIQUES: Pour de petits échantillons, des tables sont présentées dans CONOVER (1971 table A7 p. 448). Pour les grands échantillons ($n_1 \geq 20$, $n_2 \geq 20$ et $n_2 \geq n_1$), on utilise une approximation normale avec:
$E(U) = n_1(N+1)/2$, $VAR(U) = n_1 n_2 (N+1)/12$

et $$H_\alpha = E(U) + Z_\alpha \, VAR(U)^{\frac{1}{2}}$$

Tableau sommaire pour un seuil de 95%.

	$n_1=n_2=20$	$n_1=20$, $n_2=50$	$n_1=n_2=50$	$n_1=50$ $n_2=100$
unilatéral	471	902	2764	7963
bilatéral	(338,482)	(557,928)	(2240,2810)	(3283,8042)

CORRECTIONS: 1. On utilise la correction: $H_\alpha^* = H_\alpha - \frac{1}{2}$ lorsque l'on doit travailler avec l'approximation normale. 2. On utilise les rangs moyens et on ajuste la variance de la façon suivante:

$$VAR(U) = \frac{n_1 n_2 (N+1)}{12} \left[1 - \sum_{s=1}^{S} \frac{t_s^3 - t_s}{N^3-N}\right]$$

où s = nombre de groupes où il y a égalité et où t_s = nombre de valeurs égales dans le groupe s.

PUISSANCE: On utilise souvent ce test à cause de sa puissance: EAR = 0.955 versus le test de Student pour des données normales et EAR ≥ 1.0 pour plusieurs distributions autres que normale.

RÉFÉRENCES: 1- LEHMAN, E.L. (1975). Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks. Holden-Day, San Francisco, 457 p.

TEST DE LETTENMAIER/MANN-WHITNEY — FICHE # 2

OBJET DU TEST: 1- Égalité des moyennes de deux échantillons ($\mu_1=\mu_2$). 2- Moyennes différentes, sous forme unilatérale ($\mu_1 \leq \mu_2$ ou $\mu_2 \leq \mu_1$) ou bilatérale ($\mu_1 \neq \mu_2$).

CONDITIONS D'APPLICATION: la série contient une persistance, à court terme, de type markovien. La série ne doit pas contenir de saisonnalités.

APPLICATION POUR LES TENDANCES: On divise la série en deux parties 1, ..., n_1 et (n_1+1), ..., N, avec $n_2 = N-n_1$, et n_2 n'a pas à égaler n_1. On peut alors tester pour détecter une tendance sur la moyenne. Ce test est plus approprié pour détecter une tendance par saut, mais il détectera également des tendances monotones.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: Si une composante de saisonnalité est présente, on peut alors utilisé le test de MANN- WHITNEY SAISONNIER / LETTENMAIER fiche # 4. On calcule n_1^* et n_2^* à l'aide du I obtenu avec N.

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: On donne les rangs pour l'échantillon complet $x_1 \ldots x_N$. Soit R_{i1} = le rang de la i^eobservation du groupe 1. On utilise de nouveau la statistique: $U = \sum_{i=1}^{n_1} R_{i1}$

VALEURS CRITIQUES: On utilise les mêmes résultats que pour le test de MANN-WHITNEY en ajustant la variance à l'aide du contenu en information, I (voir fiche # A 1).

$E(U) = n_1(N+1)/2$, $VAR(U) = n_1 n_2 (N+1)/(12.I)$

et $$H_\alpha = E(U) + Z_\alpha \, VAR(U)^{\frac{1}{2}}$$

CORRECTIONS: 1. On utilise la correction: $H_\alpha^* = H_\alpha - \frac{1}{2}$ lorsque l'on travaille avec l'approximation normale. 2. On utilise les rangs moyens et on ajuste la variance de la façon suivante:

$$VAR(U) = \frac{n_1 n_2 (N+1)}{12} \left[1 - \sum_{s=1}^{S} \frac{t_s^3 - t_s}{N^3 - N}\right]$$

où s = nombre de groupe où il y a égalité et où t_s = nombre de valeurs égales dans le groupe s.

PUISSANCE: La puissance de ce test est équivalente à celle de MANN-WHITNEY pour le N*.

RÉFÉRENCES: 2- LETTENMAIER, D.P. (1976). Detection of Trends in Water Quality Data From Records with Dependent Observations. Water Resources Research. 12(5) 1037-1046.

TEST DE KENDALL FICHE # 5.1

OBJET DU TEST: 1-Indépendance entre deux séries de mesures. 2-Tendances monotones, négatives ou positives, sous forme unilatérale ou bilatérale.

CONDITIONS D'APPLICATION: La série ne doit pas contenir de saisonnalités ou de persistance

APPLICATION POUR LES TENDANCES: Application directe en utilisant le temps comme une série de référence.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: Ce test apparait bien approprié pour détecter une tendance monotone linéaire, mais peut aussi être utilisé pour détecter d'autres types de tendances monotones. En présence de saisonnalités, on doit se référer au test de KENDALL SAISONNIER fiche # 7 et en présence de persistance, on utilisera le test de LETTENMAIER/SPEARMAN fiche # 6.

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: Soit P, le nombre de paires concordantes et Q, le nombre de paires discordantes parmi les N(N-1)/2 paires distinctes possibles (P+Q = N(N-1)/2). Une paire est dite concordante si pour $i \leq j$ alors $R_i \leq R_j$ inversement, une paire est dites discordante si pour $i \leq j$ alors $R_i \geq R_j$. On utilise alors la statistique: K = P - Q.

VALEURS CRITIQUES: 1-Pour N≤60, CONOVER (1971) présente les valeurs critiques pour différents seuils. Alors que pour N≥60 on utilise l'approximation du percentile de H par: $H_\alpha = Z_\alpha \left[(N(N-1)\ (2N+5))/18\right]^{0.5}$.

2-Tableau sommaire des valeurs critiques pour un seuil de 95%.

N	4	5	6	7	10	15	25	40	60	100	150
unilatéral	4	6	9	11	19	33	70	142	258	553	1013
bilatéral	6	8	11	13	21	39	84	168	306	659	1206

CORRECTIONS: On utilise la correction de continuité $H_\alpha^* = H_\alpha + 1$ avec un rejet pour $K > H_\alpha^*$ et non $K \geq H_\alpha^*$. 2-On attribue le rang moyen à chacune des valeurs égales et on ajuste H_α:

$$H_\alpha = Z_\alpha \left[N(N-1)\ (2N+5)/18 - \sum_{a=1}^{A} t_a(t_a-1)\ (2t_a+5)/18\right]^{0.5}$$

où A = nombre de groupes de valeurs égales et où t_a = nombre de valeurs égales pour le groupe a.

PUISSANCE: Si (X_i, Y_i), i=1...N sont indépendants et identiquement distribués selon une loi bivariée, on obtient alors les E.A.R. suivantes pour K par rapport à l'utilisation du r de Pearson (paramétrique) comme statistique d'un test: 0.912 en présence d'une loi normale, 1.0 en présence d'une loi uniforme et 1.266 en présence d'une loi double exponentielle (STUART; 1954).

RÉFÉRENCES: 1- CONOVER, W.J. (1971). Practical Nonparametric Statistics. 2ed. John Wiley, New York, 493 p. 2- HIRSCH, R.M. Jr. et SLACK, J.K. (1982). Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data. Water Resources Research, 18(1): 107-121.

TEST DE LETTENMAIER/SPEARMAN — FICHE # 6

OBJET DU TEST: 1- Indépendance entre deux séries de mesures synchrones. 2- Tendances monotones, négatives ou positives, sous forme unilatérale ou bilatérale.

CONDITIONS D'APPLICATION: Les séries de mesures ne doivent pas contenir de saisonnalités.

APPLICATION POUR LES TENDANCES: Application directe en utilisant le temps comme une des séries de mesures. L'autre série sera la série de mesures pour laquelle on veut détecter une tendance.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: Ce test apparait plus approprié pour détecter une tendance monotone linéaire, mais peut aussi être utilisé pour détecter d'autres types de tendances monotones. En présence de saisonnalités, aucun développement particulier n'a encore été construit, on doit alors se référer au test de HIRSCH et SLACK fiche # 8.

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: On utilise ici les rangs des observations pour construire la statistique. Soit R: le rang de l'observation échantillonnée au temps de rang i. On pose alors $d_i = R_i - i$: la différence entre le rang de l'observation et le rang de la mesure dans le temps. On aura donc $R_i \epsilon \{1,\ldots,N\}$ et $i \epsilon \{1,\ldots,N\}$. La statistique utilisée est alors:

$$r_s = 1 - (6 \sum_{i=1}^{N} d_i^2 / (N^3-N)).$$

VALEURS CRITIQUES: On utilise les mêmes valeurs critiques que pour le test de SPEARMAN, sauf que l'on travaille avec le nombre effectif N* plutôt qu'avec N, voir fiche # A1.

CORRECTIONS: On travaille comme pour le test de SPEARMAN mais avec le nombre effectif N*.

PUISSANCE: Même puissance que le test de SPEARMAN par rapport à l'utilisation du r de PEARSON, au niveau échantillonnal N*.

RÉFÉRENCES: 2- LETTENMAIER, D.P. (1976). Detection of Trends in Water Quality Data from Records with Dependent Observations. Water Resources Research, 12(5), 1037-1046.

TEST DE KENDALL SAISONNIER — FICHE # 7

OBJET DU TEST: 1- Indépendance entre deux séries synchrones contenant des saisonnalités. 2- Tendances monotones, négatives ou positives, sous forme unilatérale ou bilatérale.

CONDITIONS D'APPLICATION: Les séries de mesures ne doivent pas comporter de dépendance autre que la saisonnalité et la tendance. On doit donc s'assurer qu'aucune persistance n'est présente.

APPLICATION POUR LES TENDANCES: Application directe pour la détection de tendance sur la moyenne en présence de saisonnalités, en utilisant le temps comme une des séries de mesures.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: En présence de persistance, on peut se reporter au test de HIRSCH et SLACK, fiche # 8.

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: Ce test utilise les statistiques de KENDALL calculées à l'intérieur de chaque saison. On divise d'abord la série de mesures en sections afin d'avoir, à l'intérieur de chaque section, des données qui semblent être affectées de façon homogène par la composante saisonnière. Soit S = nombre de saisons, on calcule pour s = 1, ...S: $k_s = P_s - Q_s$ où P_s = nombre de paires concordantes pour la saison s et où Q_s = nombre de paires discordantes pour la saison s (réf. test de KENDALL fiche # 5.1). Le nombre de données à l'intérieur de chaque saison n'a pas à être le même. La statistique utilisé est alors: $KS = \sum_{s=1}^{S} k_s$.

VALEURS CRITIQUES: Pour $n_s \geq 3$ s = 1...S, on utilise les résultats:
$E(KS) = 0$ et $Var(KS) = \sum_{s=1}^{S} [n_s(n_s-1)(2n_s+5)]/18$ pour construire la statistique $\frac{KS}{(Var(KS))^{\frac{1}{2}}}$ qui suit approximativement une loi normale centrée-réduite.
On a donc: $H_\alpha = Z_\alpha \left[\sum_{s=1}^{S} [n_s(n_s-1)(2n_s+5)]/18\right]^{0.5}$
Comme aucune table n'est disponible pour de petits échantillons ($n_s \leq 2$) et comme l'approximation normale n'est pas très précise dans ce cas, ce test ne sera pas utilisé dans de telles circonstance.

CORRECTIONS: 1- On utilise la correction $H_\alpha^* = H_\alpha + 1$. 2- On effectue à l'intérieur de chaque saison la correction présentée dans le test de KENDALL fiche # 5.1.

PUISSANCE: Pas de référence connue sur la puissance de ce test.

RÉFÉRENCES: 2- HIRSCH, R.M. et J.R. SLACK (1982). Techniques of Trend Analyses for Montlhy Water Quality Data. Water Resources Research, 18(1): 107-121.

TEST DE VAN BELLE ET HUGHES Fiche # 7 A

On utilise ce test pour compléter l'analyse à l'aide du test KENDALL SAISONNIER (fiche # 7). Ainsi, lorsque la tendance n'est pas homogène entre les saisons, le test de KENDALL SAISONNIER peut ne pas détecter de tendance générale malgré des tendances très évidentes à l'intérieur des saisons, pour un exemple particulier de ce résultat, voir VAN BELLE et HUGHES, 1984 p. 130.

Ce test est utilisé automatiquement par le logiciel lorsque l'on accepte l'absence de tendance à l'aide du test KENDALL SAISONNIER, on cherche alors à détecter des tendances particulières à l'intérieur des saisons.

Construction du test: On calcule les k_s comme dans le test KENDALL SAISONNIER et on construit ensuite:

$$\chi^2_{total} = \sum_{s=1}^{S} k_s^2 / Var(k_s) \text{ et } \chi^2_{tend.} = (KS)^2 / Var(KS)$$

on a finalement:

$$\chi^2_{homogène} = \chi^2_{total} - \chi^2_{tend.} .$$

Sous l'hypothèse d'absence de tendance on a:

$$\chi^2_{homogène} \sim \chi^2_{s-1} \quad \text{et} \quad \chi^2_{tend.} \sim \chi^2_1$$

Comme on a déjà accepté l'absence d'une tendance générale, le $\chi^2_{tend.}$ ne devrait pas être significatif. On teste ensuite afin de savoir si le $\chi^2_{homogène}$ est significatif. Dans l'affirmative, on conclut à la présence de tendances à l'intérieur des saisons et on recherche alors le "pattern" à cette hétérogénéité à l'aide des contrastes (VAN BELLE et HUGHES 1984, p. 130).

RÉFÉRENCE: VAN BELLE, G. et J.P. HUGHES (1984). Non Parametric Tests for Trends in Water Quality. Water Reseources Research. 20.1, 127-136.

TEST DE HIRSCH ET SLACK FICHE # 8

OBJET DU TEST: 1- Indépendance entre deux séries synchrones contenant des saisonnalités. 2- Tendances monotones, négatives ou positives, sous forme unilatérale ou bilatérale.

CONDITIONS D'APPLICATION: La série de mesures peut contenir persistance et saisonnalités.

APPLICATION POUR LES TENDANCES: Application directe pour la détection de tendance sur la moyenne en présence de saisonnalité et de persistance en utilisant le temps comme une des séries de mesures.

RENSEIGNEMENTS SUPPLÉMENTAIRES: Ce test sera moins puissant que le test de KENDALL SAISONNIER fiche # 7 s'il n'y a pas de persistance.

EXPRESSION ET MODE DE CALCUL: On construit la statistique KS comme pour le test KENDALL SAISONNIER fiche # 7 et on la nomme HS.

VALEURS CRITIQUES: Comme les données ne sont pas indépendantes:

$$VAR\ (HS) = \sum_{s=1}^{S} VAR\ (k_s) + 2 \sum_{s=1}^{S} \sum_{l=s}^{S} Cov\ (k_s, k_l)$$

et la somme des termes de covariance n'est pas nulle.
On estime alors Cov (k_s, k_l) avec:

$$\sigma_{sl} = [K_{sl} + 4 \sum_{i=1}^{n} R_{is} R_{il} - n(n+1)^2]/3$$

avec $K_{sl} = \sum_{i \leq j} sign\ [(x_{js} - x_{is})\ (x_{jl} - x_{il})]$
et on suppose ici $n_s = n$ pour $s = 1 \ldots S$.
x_{ij} = valeur mesurée pour l'année i et la saison j
R_{ij} = rang de x_{ij} à l'intérieur du groupe de valeurs de la saison j
Lorsque les n_s ne sont pas tous égaux, on utilise:

$$\sigma_{sl} = [K_{sl} + 4 \sum_{i=1}^{n} R_{is} R_{il} - n\ (n_s + 1)\ (n_l + 1)]/3.$$

On utilise finalement: $H_\alpha = Z_\alpha\ .\ (Var\ (HS))^{0.5}$ avec Var (HS) calculée à l'aide des σ_{sl}.

CORRECTIONS: 1- On utilise la correction $H_\alpha^* = H_\alpha + 1$. 2- Les termes Var (k_s) sont ajustés comme pour le test KENDALL SAISONNIER fiche # 7. Pour ce qui est des termes σ_{sl} ils demeurent les mêmes, mais on utilise les rangs moyens pour les cas d'égalité.

PUISSANCE: Aucune étude de puissance ne nous est connue. On peut cependant dire que l'approximation normale que l'on utilise sera bonne pour un ensemble ayant au moins une dizaine d'années.

RÉFÉRENCES: HIRSCH, R.M. et J.R. SLACK (1984). A nonparametric Trend Test for Seasonal Data With Serial Dependence. Water Resources Research, 20.6, 727-732.

Annexe 4

Liste des lacs du réseau

TADPA-Québec

Liste des lacs du réseau TADPA-Québec

Région	Nlac	Nom	Type de Station
1	101	Bonneville	Temporelle
1	102	Lagou	Temporelle
1	111	Veilleux	Spatiale
1	112	Macleod	Spatiale
1	113	Josselin	Spatiale
1	114	Najoua	Spatiale
2	201	Eclair	Temporelle
2	202	Lemaine	Temporelle
2	203	Truite-Rouge	Temporelle
2	211	Congré	Spatiale
2	212	Fauvette	Spatiale
2	213	Adanys	Spatiale
2	214	Boisvert	Spatiale
2	215	Thibert	Spatiale
3	301	Chômeur	Temporelle
3	302	Thomas	Temporelle
3	303	Nolette	Temporelle
3	311	Daniel	Spatiale
3	312	Belle Truite	Spatiale
3	313	Pothier	Spatiale
3	314	Laurent	Spatiale
4	401	Chevreuil	Temporelle
4	402	Kidney	Temporelle
4	411	Des Joncs	Spatiale
4	412	Du Général-White	Spatiale
4	413	Grégoire	Spatiale
4	414	Des Papillons	Spatiale

Région	Nlac	Nom	Type de Station
5	501	Blais	Temporelle
5	502	David	Temporelle
5	511	Scelier	Spatiale
5	512	Bohême	Spatiale
5	513	Sheridan	Spatiale
5	514	Clair	Spatiale
5	515	Duck	Spatiale
5	516	Graham	Spatiale
6	601	6827	Temporelle
6	602	88188	Temporelle
6	603	Poirier	Temporelle
6	604	Blériot	Temporelle
6	611	Padnom	Spatiale
6	612	Murex	Spatiale